

Resumen

El creciente problema por la contaminación del agua por metales ha despertado un gran interés en el desarrollo de medios económicos para reducir las concentraciones de metales pesados. Actualmente, uno de los métodos con los que se trabaja es la biosorción.

Para poder automatizar los procesos de biosorción, se utilizan sistemas de flujo tipo FIA y SIA, sistemas en los que es importante conocer el caudal que circula.

El principal objetivo de este proyecto es la obtención de un medidor de flujo capaz de medir en las condiciones fijadas por el trabajo. Estas condiciones son, en esencia, condiciones de escala milimétrica, es decir, caudales muy bajos (del orden de pocos ml/min) de líquidos que circulan por tubos de diámetros muy pequeños (del orden de 1 mm).

Para ello, se ha realizado un estudio bibliográfico sobre los diferentes tipos de medidores de flujo implementados comercialmente y en investigación. Seguidamente, se ha realizado un estudio de mercado a través de varios distribuidores y fabricantes para conocer la oferta que se ofrece en relación a medidores que cumplan con las características del proyecto. La búsqueda fue satisfactoria, y se pudo adquirir un medidor de flujo comercial: el sensor SLI-2000, del fabricante Sensirion. Finalmente se ha implementado el medidor en los sistemas de flujo utilizados en el laboratorio para la monitorización de procesos de descontaminación de aguas (sistemas FIA y SIA) para estudiar su comportamiento y verificar su idoneidad.

Los resultados de las pruebas realizadas con el medidor incluido en los sistemas de flujo revelan el correcto funcionamiento del mismo, además de presentar múltiples ventajas en cuanto a precisión de medida en rangos de caudales bajos, posibilidad de adquirir gran cantidad de datos y uso en procesos continuos y largos (especialmente interesante para monitorizar procesos).

Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
1. GLOSSARI	6
2. PREFACIO	9
2.1. Origen del proyecto	9
2.2. Motivación	9
3. INTRODUCCIÓN	10
3.1. Objetivos del proyecto	10
3.2. Alcance del proyecto	10
4. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE FLUJO	11
4.1. Técnica del análisis por inyección de flujo (FIA)	11
4.2. Técnica del análisis por inyección secuencial (SIA)	12
5. MEDIDOR DE FLUJO	14
5.1. ¿Qué es un caudalímetro?	14
5.2. Propiedades físicas de los fluidos	14
5.2.1. Densidad de un fluido	14
5.2.2. Viscosidad	15
5.3. Conceptos básicos referidos al flujo a través de una tubería	16
5.3.1. Número de Reynolds, Re	16
5.3.2. Tipo de flujo	17
5.4. Selección del medidor de flujo	18
5.5. Tipos de medidores de flujo y clasificación	19
5.5.1. Medidores de presión diferencial	20
5.5.1.1. Medidor de placas de orificio	22
5.5.1.2. Tubo Venturi	25
5.5.1.3. Toberas	26
5.5.1.4. Medidor de codo	27
5.5.1.5. Medidores de placa	27
5.5.1.6. Tubo Pitot	28
5.5.2. Medidores de área variable	29

5.5.3.	Medidores por accionamiento mecánico.....	32
5.5.3.1.	Medidores de Turbina	32
5.5.3.2.	Medidores de desplazamiento positivo	35
5.5.3.2.1.....	Medidores de tipo pistón oscilante	36
5.5.3.2.2.....	Medidores helicoidales (multirotor)	36
5.5.3.2.3.....	Medidores de rueda oval	37
5.5.3.2.4.....	Medidores de disco giratorio.....	37
5.5.3.2.5.....	Medidores de paletas deslizantes.....	37
5.5.4.	Medidores oscilatorios	38
5.5.4.1.	Medidores por formación torbellino	38
5.5.4.2.	Medidores por formación de remolinos	42
5.5.5.	Medidores electromagnéticos	43
5.5.6.	Medidores ultrasónicos	46
5.5.6.1.	Medidores Doppler.....	46
5.5.6.2.	Medidores de tiempo de vuelo	47
5.5.7.	Medidores térmicos para líquidos	48
6.	ESTADO DEL ARTE	50
6.1.	Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detection (C ⁴ D).....	50
6.2.	Método usando ultrasonidos.....	52
6.3.	Sensor de flujo micro mecánico.....	53
7.	ESTUDIO DE MERCADO	54
7.1.	Medidor de Sensirion	56
7.2.	Medidores de ABB.....	57
7.3.	Medidor KOBOLD.....	57
7.4.	Comparativa y elección final	58
8.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	60
8.1.	Calibración bomba peristáltica.....	60
8.1.1.	Bomba persitáltica MINIPULS® 3.....	60
8.1.2.	Montaje experimental.....	62
8.2.	Estudio de funcionamiento del sensor Sensirion SLI-2000 en sistemas de flujo FIA.....	63
8.2.1.	Software de visualización Sensirion.....	64

8.2.2. Montaje experimental sin supresor de pulsos	71
8.2.3. Montaje experimental con supresor de pulsos	73
8.3. Estudio de funcionamiento del sensor Sensirion SLI-2000 en sistemas de flujo SIA	74
9. RESULTADOS	77
9.1. Calibración bomba peristáltica	77
9.2. Estudio de funcionamiento del sensor Sensirion SLI-2000 en sistemas de flujo FIA	77
9.2.1. Montaje experimental sin supresor de pulsos	77
9.2.2. Montaje experimental con supresor de pulsos	81
9.3. Estudio de funcionamiento del sensor Sensirion SLI-2000 en sistemas de flujo SIA	83
10. CONCLUSIONES	85
11. ESTUDIO ECONÓMICO	86
12. CONSIDERACIONES AMBIENTALES	88
13. AGRADECIMIENTOS	89
14. BIBLIOGRAFIA	90

1. Glossari

Símbolo/ Acrónimo	Descripción	Símbolo/ Acrónimo	Descripción
"	Pulgadas	ft	Frecuencia del transmisor
€	Euros	g	Gravedad
A1, A2	Sección	g	Gramo
B	Flujo magnético	h	Hora
c	Velocidad del sonido	hf	Diámetro de la barrera de obstrucción
C	Coeficiente de descarga	l	Longitud
cm	Centímetros	l	Litros
Cp	Calor específico	K	Factor K
Cx1 - Cx5	Capacitancias	kg	Kilogramo
d	Diámetro de la obstrucción	l	Intensidad
D	Diámetro de tubo o tubería	m	Masa
dv/dy	Gradiente de velocidad	m	Metro
E	Velocidad del coeficiente de aproximación	mbar	Milibar
ETSEIB	Escola Técnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona	min	Minuto
f	Frecuencia	ml/min	Mililitros por minuto
FIA	Flow Injection Analysis	mm	Milímetros

Mpa	Megapascal	U	Potencial
ms	Milisegundo	Ux1, Ux2	Señales de potencial
nm	Nanometro	V	Volumen
N	Newton	v	Velocidad
P	Poise	Vin	Voltage
P1, P2	Presión	vm	Velocidad media
PVC	Polyvinyl Chloride	Z1, Z2	Alturas
q	Calor	α	Ángulo ultrasonidos respecto a la dirección del flujo
Qm	Caudal másico	β	Relación diámetros de obstrucción y de tubería
Qv	Caudal volumétrico	γ	Peso específico
Re	Número de Reynolds	γ_{agua}	Peso específico del agua
rpm	Revoluciones por minuto	Δf	Variación de frecuencia
Rx1-Rx4	Resistencias	ΔP	Variación de presión
s	Segundos	Δt	Variación de tiempo
S	Gravedad específica	ΔT	Variación de temperatura
S	Número de Strouhal	ΔU	Diferencia de potencial
SIA	Sequential Injection Analysis	ϵ	Factor de expansibilidad
st	Stoke	θ	Ángulo de incidencia de los ultrasonidos
t	Tiempo	μ	Viscosidad dinámica
μl	Microlitros	v	Viscosidad cinemática

μm	Micrometros	ρ	Densidad
μrad	Microradianes	ρ_{agua}	Densidad del agua
μS	Microsiemens	τ	Esfuerzo cortante

2. Prefacio

2.1. Origen del proyecto

El presente Trabajo de Final de Grado es una contribución a los proyectos de investigación Desarrollo de Tecnología a Escala Piloto para Depuración de Aguas Contaminadas con Iones Metálicos mediante Residuos Agroalimentarios (TECMET), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, Madrid, 2013-2015 (proyecto CTM2012-37215-C02-02), y Síntesis Verde de Nanopartículas Metálicas a partir de Aguas Ácidas de Mina y Extractos de Residuos Agroalimentarios, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, Madrid, y funds FEDER, EU, 2016-2018 (proyecto CTM2015-68859-C2-2-R; MINECO/FEDER). El proyecto se desarrolla por el Departament d'Enginyeria Química de la Escola Técnica Superior d'Enginyeria Química de Barcelona, UPC, en colaboración con la Universitat de Girona.

2.2. Motivación

El creciente problema por la contaminación del agua por metales ha despertado un gran interés en el desarrollo de medios económicos para reducir las concentraciones de metales pesados. Actualmente, uno de los métodos con los que se trabaja es la biosorción.

Para poder automatizar los procesos de biosorción, se utilizan sistemas de flujo tipo FIA y SIA. En dichos sistemas, dos corrientes o dos reactivos se mezclan, y se requiere que esta mezcla se produzca de forma equimolar, para que al final la concentración de cada uno de los reactivos se haga la mitad. Por ello, es necesaria la medición de caudal mediante un medidor de flujo.

El presente proyecto tiene por principal motivación la obtención de un medidor de flujo capaz de medir caudales muy bajos y el estudio de su comportamiento para su posterior incorporación a los sistemas de flujo.

3. Introducción

3.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es la obtención de un medidor de flujo capaz de medir caudales bajos, para estudiar su comportamiento e incorporarlo en el laboratorio en sistemas de análisis de flujo tipo FIA y SIA.

Para ello, se estudiarán los diferentes tipos de medidores de flujo (o caudalímetros) que existen actualmente para entender su funcionamiento y escoger el que mejor se adapte a las condiciones de los sistemas de flujo. Seguidamente, se realizará un estudio de mercado para finalmente escoger el medidor más adecuado para poder cumplir con el objetivo principal del proyecto.

3.2. Alcance del proyecto

El desarrollo del proyecto puede dividirse en tres partes diferenciadas.

En primera instancia, se ha realizado una búsqueda bibliográfica de los tipos de medidores de flujo. Tras su estudio, se ha realizado un estudio de mercado, en contacto con diferentes empresas y distribuidores dedicados al sector, mediante los cuales se han obtenido varias opciones válidas para finalmente escoger el medidor más adecuado.

Finalmente, tras la adquisición del dispositivo, se ha procedido a su incorporación al laboratorio. Se ha estudiado su comportamiento, en comparación con los datos proporcionados por el fabricante del dispositivo.

4. Métodos de análisis de flujo

Los métodos de análisis de flujo nacen de la necesidad de automatizar sistemas de flujo. Esta automatización permite realizar ensayos en continuo generando una gran cantidad de datos y reduce el tiempo de realización de ensayos, la preparación de muestras y patrones y su posterior análisis.

Existen varias técnicas para el análisis de flujo, entre las cuales destacan por su importancia la técnica de análisis por inyección de flujo (FIA) y el análisis por inyección secuencial (SIA).

4.1. Técnica del análisis por inyección de flujo (FIA)

La técnica por inyección de flujo (FIA, de sus siglas en inglés *Flow Injection Analysis*) tiene su origen en Dinamarca en 1975, y fue desarrollada por *J.Ruzicka* y *E.H. Hansen* [1]. Empezó como herramienta para el muestreo en ensayos, hasta convertirse en una aplicación de importancia en diferentes sectores para la automatización de sistemas de flujo complejos.

Esta técnica se basa en la inyección de pequeños volúmenes fijos, del orden de micro litros, de una muestra en una corriente de líquido continua, llamada disolución portadora [2][3]. Esta corriente circula constantemente hacia un detector en el cual se realiza la medida de una propiedad físico-química y establece una línea de base que sirve como referencia, de manera que al pasar una muestra, la propiedad físico-química a medir generará una señal la cuál formará un pico respecto a la línea de base. La altura y el área del pico son proporcionales a la concentración del analito. De esta manera, utilizándose patrones de concentración conocida puede obtenerse una curva de calibración.

Los componentes de un sistema FIA se pueden observar en la **Figura 4.1**, y son los siguientes: una bomba peristáltica, encargada de impulsar las disoluciones; un sistema de inyección para inyectar las muestras en la disolución portadora; un sistema de detección, para medir la propiedad físico-química de interés; y una serie de tubos de teflón por los que circulan las disoluciones.

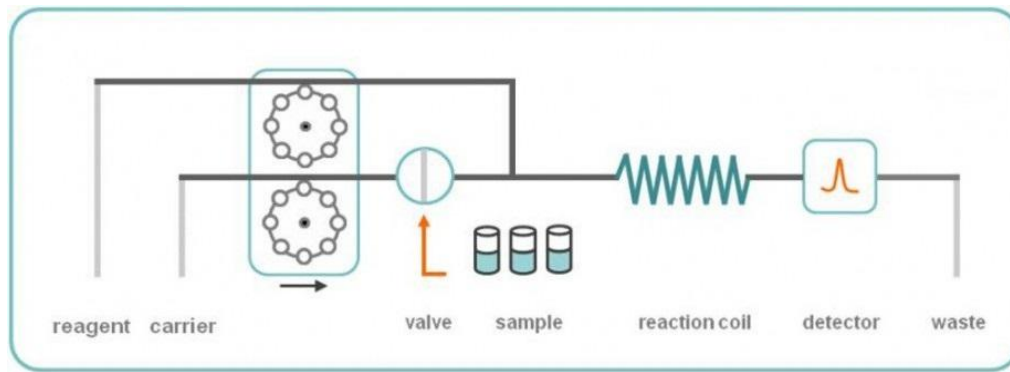


Figura 4.1 Esquema de un sistema FIA [4]

4.2. Técnica del análisis por inyección secuencial (SIA)

La técnica del análisis por inyección secuencial (SIA, de sus siglas en inglés *Sequential Injection Analysis*) fue desarrollada por J. Ruzicka y G. Marshall como alternativa al sistema FIA. En la **Figura 4.2** puede observarse un esquema de un sistema SIA.

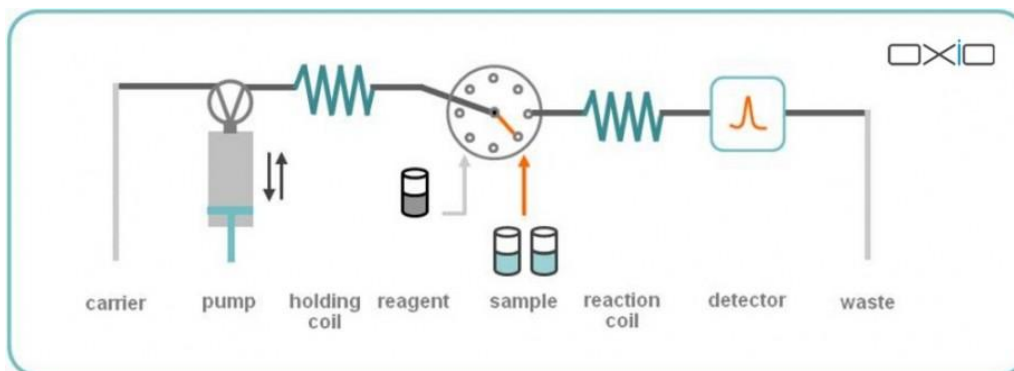


Figura 4.2 Esquema de un sistema SIA [4]

Los trabajos realizados con sistemas FIA ponían de manifiesto problemas ante la realización de varios experimentos, pues para cada uno se debe remodelar el sistema. La aparición del sistema de flujo SIA ofrecía la posibilidad de resolver este problema.

El principio de operación es el mismo que para el sistema FIA: la inyección de una muestra en un fluido en movimiento. Pero los sistemas SIA incluyen dos diferencias fundamentales con respecto a los sistemas FIA.

La primera de estas diferencias es el sistema de inyección. En el caso del SIA, la inyección se realiza mediante una bomba pistón, generalmente jeringas, lo que permite obtener un flujo bidireccional (por inyección y por aspiración) además de que supone una disminución del gasto de reactivos al no trabajar en flujo continuo. No obstante, esta condición supone una menor frecuencia de muestro con respecto al sistema FIA al no tratarse de un flujo

continuo.

El uso de jeringas también supone una ventaja respecto al uso de bombas peristálticas, y es que proporciona mayor robustez al sistema. Las bombas peristálticas usan tubos que generalmente pueden verse dañados por algunos reactivos, mientras que el material de las bombas de pistón suele ser Teflón o cristal.

La segunda diferencia fundamental del sistema SIA con respecto al FIA es el uso de una válvula multipuerto. Este dispositivo es el que ofrece la versatilidad que no ofrecía el sistema FIA al permitir la conexión de varios reactivos.

El sistema SIA incluye dos serpentines: uno en el canal que conecta la bomba pistón con el puerto central de la válvula multipuerto, llamado serpentín de retención, y otra en el canal que lleva al detector, llamado serpentín de reacción. El primer serpentín evita que los reactivos y las muestras lleguen hasta la jeringa, mientras que la segunda permite la mezcla completa de la muestra y de los reactivos para una mejor detección.

Otra característica de este tipo de sistema es su control por computadora. El ordenador se encarga de seleccionar como se conecta el puerto central de la válvula multipuerto con el resto de puertos, inicia y para la acción de la bomba pistón, selecciona el volumen y obtiene y procesa los datos del sistema.

5. Medidor de flujo

5.1. ¿Qué es un caudalímetro?

Según la Real Academia Española (R.A.E.), la definición de un caudalímetro es clara y sencilla:

Caudalímetro: Instrumento que sirve para medir caudales.

Una definición que Roger C. Baker amplía en su libro *Flow Measurement Handbook* [5], definiéndolo como un grupo de componentes unidos que generan una señal exclusivamente relacionada con el flujo o la cantidad de fluido fluyendo en un conducto. Esta señal, generalmente se da en forma de señal eléctrica.

5.2. Propiedades físicas de los fluidos

En este trabajo se tratará la medida de caudal para líquidos y, por lo tanto, en este capítulo se hablará de las propiedades referidas a fluidos líquidos.

5.2.1. Densidad de un fluido

La densidad del fluido, ρ , se define como la masa del fluido, m , por unidad de volumen que ocupa, V [6]:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

En líquidos, la densidad varía en función de temperatura y presión. Generalmente, la densidad disminuye con el aumento de la temperatura. En ocasiones, la información de la densidad se muestra en forma de otra propiedad de fluido llamada peso específico, γ , definido como:

$$\gamma = \rho g$$

donde g es la gravedad.

Para conocer el valor de la densidad, se dispone de valores tabulados y gráficos que la relacionan con la temperatura.

También es común utilizar la gravedad específica, una forma de relacionar la densidad (o peso específico) con la del agua:

$$S = \frac{\rho}{\rho_{agua}} = \frac{\gamma}{\gamma_{agua}}$$

Tabla 5.1 Densidad, peso específico y gravedad específica de aire y agua (condiciones estándar) [6]

Fluido	Densidad, ρ (kg/m ³)	Peso específico, γ (N/m ³)	Gravedad específica, S
Aire	1.23	12.1	0.00123
Agua	1000	9810	1

5.2.2. Viscosidad

La viscosidad es una propiedad física que surge de la fricción entre capas de fluido que circulan a diferente velocidad [6]. Es una propiedad que responde a las pérdidas de carga de un fluido circulando en el interior de tuberías y desempeña un papel fundamental en la generación de la turbulencia.

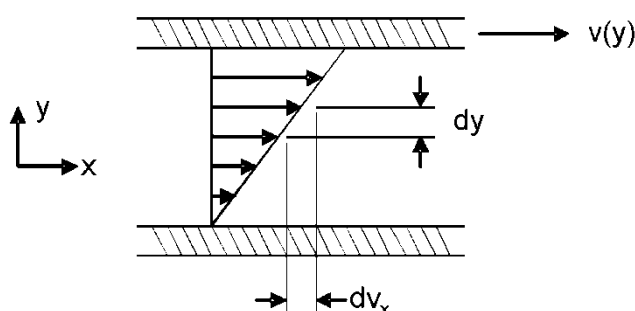


Figura 5.1 Perfil de velocidades $v(y)$

En la **Figura 5.1** se puede observar un perfil de velocidades donde la velocidad de un fluido circulando en la dirección x depende del eje y : $v = v(y)$. Esta velocidad representa la velocidad de deformación del fluido y está directamente relacionada con la viscosidad mediante la siguiente expresión:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

τ : esfuerzo cortante (N/m²),

dv/dy : gradiente de velocidad,

μ : viscosidad del fluido.

De esta expresión se deduce que para un esfuerzo cortante dado, cuanto más viscoso sea el fluido, más pequeña será su velocidad de deformación, y por tanto, se moverá más lento.

La viscosidad es una propiedad que varía considerablemente con efecto de la temperatura. No obstante, para la mayoría de fluidos y a una temperatura dada la viscosidad se mantiene constante. Estos fluidos son conocidos como fluidos Newtonianos. Por el contrario, aquellos fluidos en los que la viscosidad de un fluido en particular a una temperatura dada no es constante son conocidos como fluidos no newtonianos. La relación entre esfuerzo cortante y velocidad de deformación de los dos tipos de fluidos puede observarse en la **Figura 5.2**.

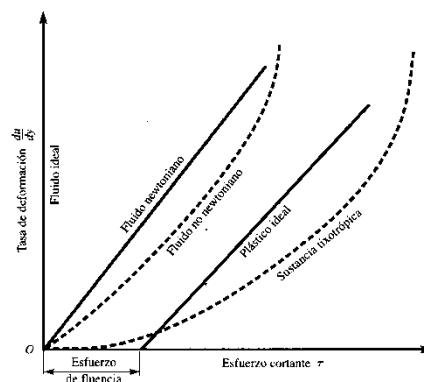


Figura 5.2 Fluidos newtonianos y no newtonianos

Hay dos maneras de expresar la viscosidad:

- Viscosidad dinámica, μ , tal y como se ha expresado hasta ahora. Es la resistencia que opone un fluido a su deformación o, lo que es lo mismo, resistencia que oponen las capas de fluido para deslizarse entre ellas. Su unidad es el Poise (P):

$$1 \text{ poise} = 1 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$$

- Viscosidad cinemática, ν : se define como el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad del líquido. Su unidad es el stoke (st).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

5.3. Conceptos básicos referidos al flujo a través de una tubería

5.3.1. Número de Reynolds, Re

Un parámetro adimensional esencial que define el flujo a través de una tubería o tubo es el número de Reynolds [7]:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

ρ : densidad del fluido

μ : viscosidad dinámica

v : velocidad del fluido en la tubería

D : diámetro de la tubería.

Este parámetro relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas viscosas. Es un parámetro importante en flujos donde la viscosidad tiene influencia, como es el caso de flujos internos.

5.3.2. Tipo de flujo

A finales del siglo XIX, el profesor Osborne Reynolds, de la universidad de Manchester, realizó un estudio mediante el cual se establecía que el flujo de un fluido podía ser de dos tipos diferentes. En este estudio, se utilizó un aparato como el de la **Figura 5.3**. El experimento consistía en un tanque lleno de agua y un tubo de vidrio por el cual el agua podía fluir al exterior del tanque. El profesor Reynolds incorporó un inyector mediante el cual inyectaba colorante dentro del tubo de vidrio para observar el comportamiento del flujo de agua. Reynolds observó que para velocidades bajas, los filamentos de colorante en el agua no se mezclaban con el agua y que eran tan estables que parecían filamentos estacionarios. En cambio, si la velocidad del flujo era elevada, el colorante sufría una mayor fluctuación hasta un punto en el que se mezclaba completamente con el agua.

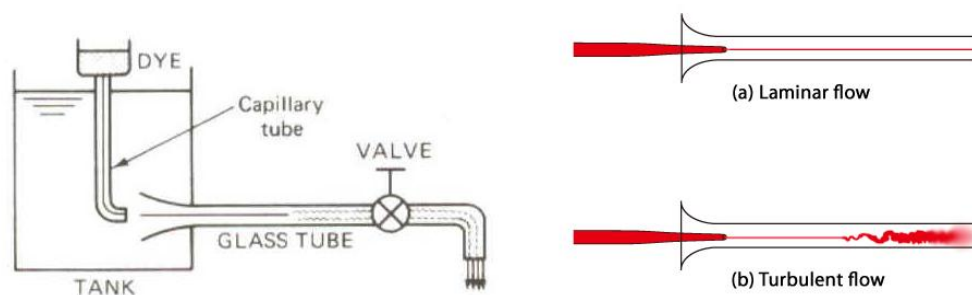


Figura 5.3 Experimento de Reynolds

Al primer tipo de flujo, el que ocurre a bajas velocidades, se le conoce como flujo laminar. Generalmente, se da para número de Reynolds inferiores a 2.000. El fluido en la pared de la tubería se “pega” a ésta, y aumenta su velocidad desde cero hasta un máximo en el centro de la tubería, generando un perfil de velocidades parabólico.

El segundo de los casos se conoce como flujo turbulento. Se da para números de Reynolds superiores a 2.000. Las partículas se mueven en trayectorias irregulares, continuamente se mezcla. Con flujo turbulento, el perfil de velocidad se denomina totalmente desarrollado. En la pared de la tubería, la velocidad sigue siendo cero, pero a medida que se avanza hacia el centro la velocidad se vuelve prácticamente constante.

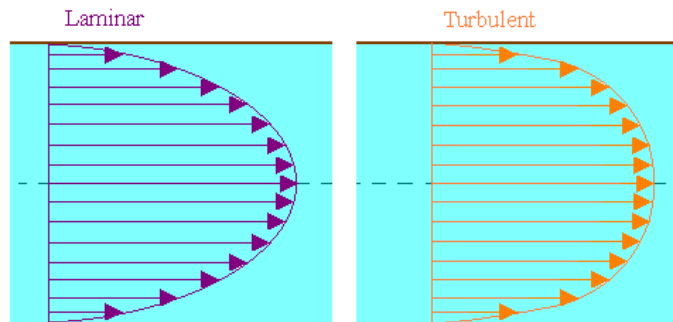


Figura 5.4 Perfiles de velocidad de flujo laminar y flujo turbulento

5.4. Selección del medidor de flujo

Para cada aplicación en particular es fundamental elegir el medidor de flujo adecuado. La elección correcta dependerá de varios factores: factores dependientes del fabricante, del tipo de fluido a medir y de las condiciones de funcionamiento y requerimientos del usuario. Bajo estos títulos se puede establecer una clasificación de los diferentes factores.

Información sobre el fabricante.

Antes de elegir un caudalímetro óptimo es importante conocer detalles sobre su fabricante, como saber si está especializado en una única aplicación o si dispone de un amplio rango de medidores. Es importante conocer la dimensión del fabricante, sin menospreciar a la pequeña (pero también especializada) empresa.

Información sobre el fluido.

Varios factores referentes al fluido son importantes para elegir un caudalímetro:

- Tipo de fluido: Composición química y estado (gas o líquido).
- Estado del fluido: limpio, sucio, contaminado, abrasivo o de dos fases.
- Propiedades del fluido: densidad, viscosidad, conductividad, opacidad, compresibilidad, inflamabilidad.

Condiciones de funcionamiento y requerimientos del usuario.

La información sobre las condiciones de funcionamiento requiere de los siguientes factores:

- Rango de flujo: máximo y mínimo.
- Flujo en canal abierto o en canal cerrado.
- En canal abierto, tamaño de la tubería: diámetros interno y externo.
- Materiales de la tubería.
- Tamaño de las conexiones del medidor con la tubería o tubo.
- Entorno: acceso, limitaciones, presiones y temperaturas de trabajo de ambiente y fluido, estabilidad del fluido y máxima pérdida de presión.
- Suministro del fluido: ¿continuo o por impulsos? Problemas por golpes de ariete.

Requerimientos del usuario:

- Facilidad de instalación.
- Protecciones IP ante polvo y agua.
- Precisión del medidor: incertidumbre y repetibilidad.
- Tiempo de respuesta.
- Coste iniciales y de instalación del medidor. Es importante considerar varios de los factores ya mencionados a la hora de comparar el precio de diferentes caudalímetros, como por ejemplo la precisión del medidor. También hay que tener en cuenta, además del coste inicial de compra y de instalación, los costes de mantenimiento y de operación.

5.5. Tipos de medidores de flujo y clasificación

Existen muchos tipos de medidores de flujo, por lo que clasificarlos correctamente es una buena manera para entender su funcionamiento. Una posible manera de clasificar los caudalímetros de forma general es mediante la medida que realizan [8]:

- Medidores de caudal volumétrico
- Medidores de caudal másico

No obstante, dentro de esta clasificación general, la manera más común de clasificar caudalímetros es mediante su principio de operación [9]:

En este trabajo se utilizará esta clasificación para presentar a los diferentes tipos de medidores de flujo.

5.5.1. Medidores de presión diferencial

Los medidores de presión diferencial son los más utilizados en aplicaciones de medida y control de flujos a nivel industrial.

Ecuación de Bernoulli [7]

Este tipo de medidores basan su principio de funcionamiento en la ecuación de Bernoulli, relacionándose el caudal volumétrico con la presión diferencial medida entre dos puntos:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2$$

P_1, P_2 : presiones en los puntos 1 y 2,

ρ : es la densidad del fluido,

v_1, v_2 : velocidades en los puntos 1 y 2,

Z_1, Z_2 : altura de los puntos 1 y 2,

g : gravedad.

La ecuación de Bernoulli relaciona la variación de la presión con la variación de velocidad en términos energéticos. La ecuación descrita es válida ante la suposición de fluido incompresible, como el caso de la mayoría de líquidos, y con densidad constante.

Mediante un dispositivo primario, se genera una presión diferencial entre dos puntos, y esta presión diferencial se mide mediante un dispositivo secundario. Ambos dispositivos comprendidos forman un medidor de presión diferencial. Normalmente, las dos tomas de presión se colocan a la misma altura. Teniendo en cuenta esta simplificación y considerando que el fluido mantiene su densidad entre los dos puntos, la ecuación de Bernoulli se reduce a la siguiente forma:

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$$

Ecuación de continuidad

Para completar el cálculo del flujo volumétrico, es necesario introducir la ecuación de continuidad.

Considerando una tubería como la de la **Figura 5.5**, con dos tramos de secciones transversales diferentes A_1 y A_2

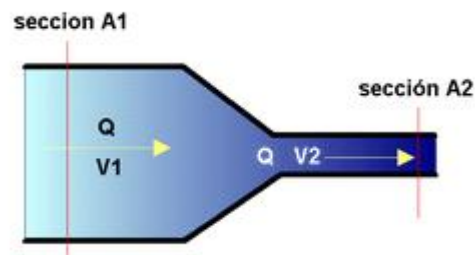


Figura 5.5 Ecuación de continuidad [10]

Si aplicamos el principio de conservación de la masa, podemos concluir que la masa que atraviesa la sección A_1 en un intervalo de tiempo dt es igual a la masa que atraviesa la sección A_2 en el mismo intervalo de tiempo. La masa de fluido es:

$$m_1 = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot dt \quad ; \quad m_2 = \rho \cdot A_2 \cdot v_2 \cdot dt \quad ; \quad m_1 = m_2$$

Si se considera que la densidad es la misma en los dos puntos, se deduce la siguiente igualdad:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

Puesto que el caudal volumétrico no es más que el producto entre la velocidad del fluido y la sección transversal que atraviesa, de la ecuación de continuidad se deduce que el caudal se mantiene constante. Así pues:

$$Q_v = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

Factores de corrección

En la realidad, ningún fluido trabaja de forma ideal, por lo que las ecuaciones teóricas no siempre son suficientes, por lo que se añaden factores de corrección basados en evidencias empíricas y en las consideraciones geométricas de los dispositivos medidores

Coeficiente de descarga, C

Se define como la relación entre caudal real y teórico:

$$C = \frac{\text{flujo real}}{\text{flujo teórico}}$$

Este coeficiente sirve para corregir la simplificación de la no existencia de pérdida de carga entre las dos tomas de presión [11]. Cuando la geometría del dispositivo primario es fija, o sus elementos son de un rango de medida muy limitado, este coeficiente se sustituye por el coeficiente de flujo, definido como:

$$K = EC$$

C : coeficiente de descarga,

E : velocidad del coeficiente de aproximación, cuya expresión es $(1-\beta^4)^{-1/2}$

β : relación entre diámetros de la obstrucción, d , e interno de la tubería, D

En la **Figura 5.6** se ve un diagrama ejemplo de una tobera.

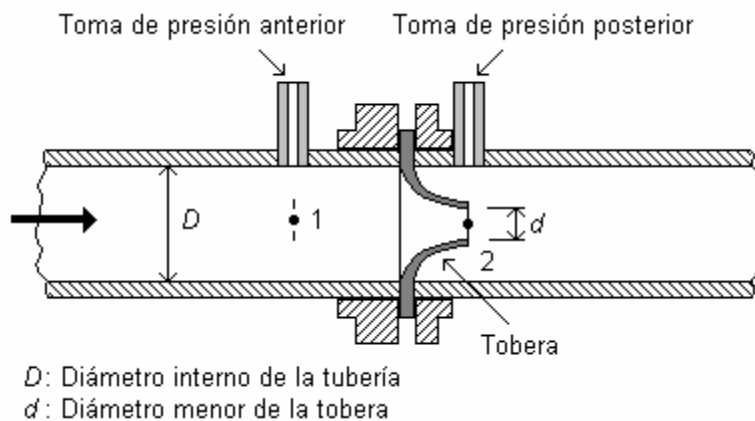


Figura 5.6 Diagrama de una tobera [12]

Factor de expansibilidad, ϵ :

Este factor permite ajustar la ecuación que se define para fluidos incompresibles, (p.e., líquidos como el agua) a fluidos compresibles como gases.

5.5.1.1. Medidor de placas de orificio

Se trata del medidor más común dentro de la familia de medidores de presión diferencial y es aparentemente sencillo de construir. Consiste en una placa de metal perforada insertada entre la conexión de dos tramos de tubería. El comportamiento del fluido al pasar a través del plato y sus posibles geometrías se deducen del conocimiento adquirido tras años de observación experimental. En la **Figura 5.7** se presenta un diagrama del funcionamiento del medidor de placas de orificio. La tubería tiene dos tomas de presión, una a cada lado de la placa: la primera, aguas arriba de la placa, es la de alta presión o High Pressure (HP); la segunda, aguas debajo de la placa, es la de baja presión o Low Pressure (LP). La presión diferencial entre ambos puntos es medida generalmente con un manómetro.

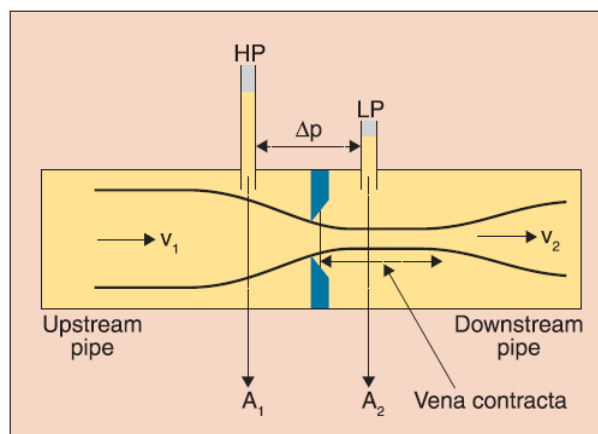


Figura 5.7 Principio de funcionamiento del medidor de placas de orificio. A1 y A2 son las secciones aguas arriba (upstream) y aguas abajo (downstream) del medido; se mide la diferencia de presión entre la toma de High Pressure (HP) y Low Pressure (LP) [13].

La placa hace que la obstrucción sea abrupta y provoca que el flujo presenta una sección inferior a la del estrechamiento del orificio denominada “vena contracta”, como se ve en la **Figura 5.8**.

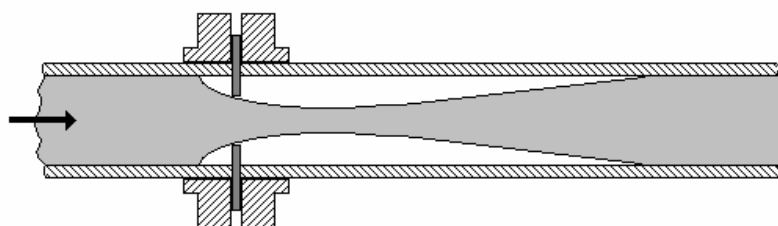


Figura 5.8 Efecto de la vena contracta [12]

Tipos de orificios

Concéntrico de cantos vivos.

En la **Figura 5.9** se muestra una imagen de un medidor con orificio concéntrico. Este tipo es el más utilizado para líquidos. El ratio entre diámetros, β , es de entre 0,2 y 0,75, y mayor de 0,75 en casos donde no sea necesario una gran precisión. Existen varios sub-tipos en función de donde se colocan las tomas de presión respecto a la posición del plato de orificio. En el caso más general, la primera toma de presión se coloca a una distancia igual a un diámetro de tubería (D) del plato, mientras que la toma de presión posterior se coloca a una distancia $D/2$.



Figura 5.9 Placa de orificio, orificio de tipo concéntrico de cantos vivos

De cuarto de círculo y de entrada cónica (Figura 5.10). Ambos diseños se utilizan para flujos con número de Reynolds bajo, a causa de fluidos líquidos de alta viscosidad.

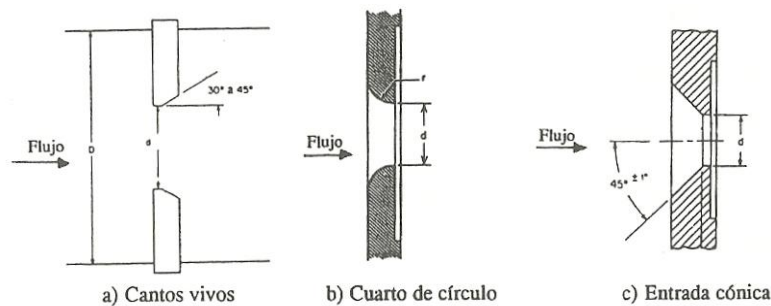


Figura 5.10 Tipos de orificios según su perfil de entrada: a) Cantos vivos; b) Cuarto de círculo; c) Entrada cónica [11].

Orificio excéntrico y segmentado (Figura 5.11). Se utilizan en el caso de fluidos líquidos con otros componentes. En el caso de platos con orificio excéntrico, el orificio estará en la parte inferior si el fluido líquido lleva consigo materia sólida, y en la parte superior si lo que tiene es gas.

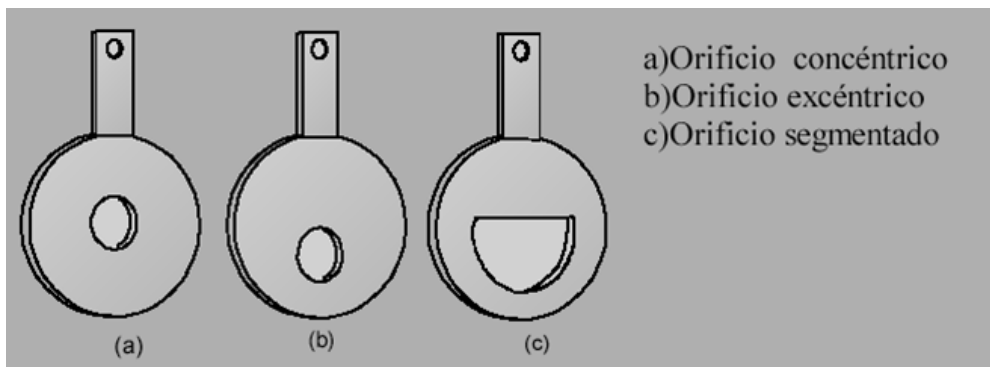


Figura 5.11 Tipos de orificios según su geometría: a) Concéntrico; b) Excéntrico; c) Segmentado

Colocación de las tomas de presión

Para la medición de la presión diferencial, se colocan dos tomas de presión: una antes del plato y otra después. Dependiendo de la colocación de estas tomas de presión, existen varias configuraciones [11]:

- En las bridas que sujetan el plato de orificio (para diámetros de más de 2 pulgadas).
- En la vena contraída: la toma de presión anterior al plato se sitúa a 1 pulgada de distancia del plato, mientras que la toma posterior se sitúa a la altura de la vena contraída (punto de mínima de presión tras el plato).
- Radiales: la configuración más utilizada. La toma de presión anterior al plato se sitúa a una distancia igual al diámetro de la tubería, D , y el posterior se sitúa a una distancia igual a $D/2$.
- En la tubería: igual que la configuración radial, pero en este caso las tomas están situadas a 2,5 y 8 diámetros de tubería, respectivamente, antes y después de la placa de orificio.

Aplicaciones, ventajas y desventajas

Usado en aplicaciones con gases limpios y líquidos limpios o corrosivos, como ácidos o bases fuertes. Su diseño relativamente sencillo y sin partes móviles lo hace fácilmente instalable. Además supone un coste poco elevado, y está disponible en una gran variedad de materiales (acero inoxidable, bronce...). Como inconvenientes, cabe destacar que requiere de tramos longitudinales de tubería aguas arriba y abajo del plato, y que se trata de un medidor intrusivo al generar una obstrucción en el paso del fluido, lo que causa una gran pérdida de carga.

5.5.1.2. Tubo Venturi

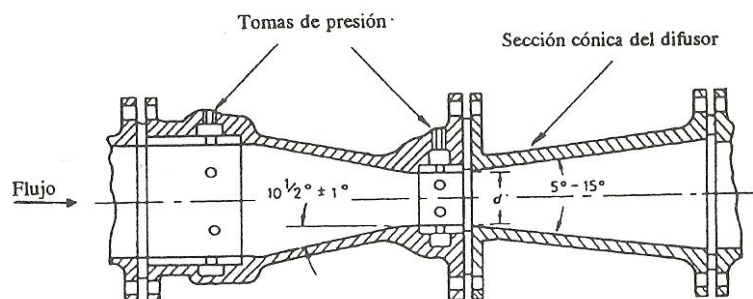


Figura 5.12 Tubo Venturi Clásico [11]

Basado en el funcionamiento de un tubo de Venturi clásico (**Figura 5.12**). Al principio de la

primera zona (entrada cónica) se sitúa la primera toma de presión. A medida que el flujo avanza, la sección va disminuyendo, hasta llegar a una zona central cilíndrica, donde la velocidad se mantiene prácticamente constante, y donde se sitúa la segunda toma de presión. La salida cónica posterior permite aumentar de nuevo la sección, disminuyendo la velocidad y, así, disminuyendo el contenido energético del fluido. Al contrario que en los platos de orificio, la suciedad no se acumula en los contornos del tubo, por lo que este tipo de medidor de presión diferencial es apto para ser usado en aplicaciones con fluidos sucios.

Al contrario de lo que ocurre en las placas de orificio, el comportamiento del fluido en tubos Venturi se acerca más a un comportamiento ideal, por lo que el coeficiente de descarga C se acerca mucho a la unidad, siendo 0,98 un valor típico.

Aplicaciones, ventajas y desventajas

Los primeros usos del Venturi clásico fueron en la industria del agua, y se ha seguido usando para la medición de flujos de agua. También ha sido utilizado en aplicaciones con fluidos de dos fases.

El tubo Venturi está limitado por su elevado coste y por la gran longitud necesaria para su instalación. Debido a su baja pérdida de carga, es especialmente útil en casos donde bombear grandes cantidades de líquido. Al igual que el medidor de placas de orificio, se trata de un medidor de obstrucción, intrusivo para el paso del fluido.

5.5.1.3. Toberas

Las toberas presentan una entrada curvada, que se prolonga en forma cilíndrica. En la **Figura 5.13** se muestran los dos tipos de toberas: la entrada curvada varía según su uso en Europa, donde la entrada es radial, o en Estados Unidos, donde la entrada es elíptica.

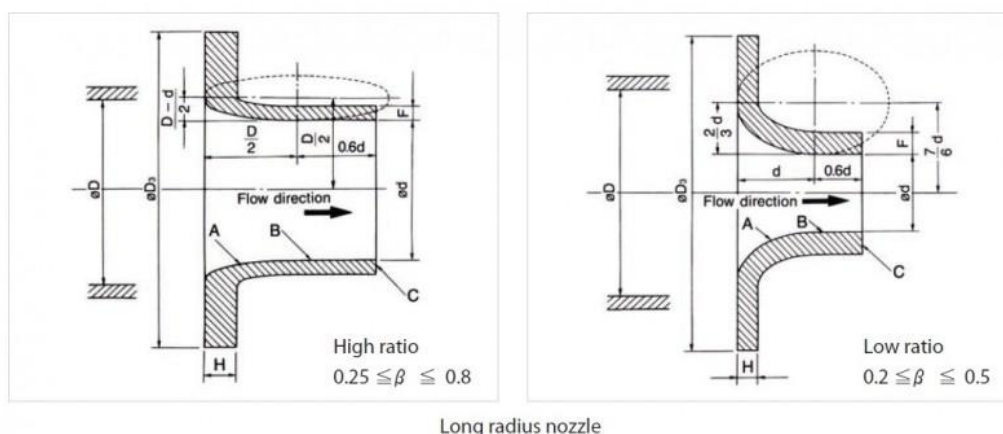


Figura 5.13 Toberas: a la izquierda, tobera con entrada elíptica (uso en Estados Unidos); a la derecha, tobera con entrada radial (uso en Europa) [14]

En el caso de toberas, el coeficiente de descarga C es de aproximadamente 0,98, como en tubos Venturi, pero la pérdida de carga es en este caso mayor que en el tubo Venturi. Para reducir esta pérdida de carga, se puede acoplar una sección divergente a la salida para obtener una situación similar a la del tubo Venturi. A este conjunto se le llama *Venturi-tobera*.

Las toberas tienden a ser más estables que las placas de orificio a altas temperaturas y velocidades, experimentan menos desgaste y suponen menos distorsión al fluido. Se suelen aplicar en flujos de vapor.

5.5.1.4. Medidor de codo

Cuando un fluido pasa a través de un codo está sometido a una aceleración que genera una fuerza centrífuga. Esta fuerza, provoca una diferencia de presión entre el radio interior y exterior del codo. Las tomas de presión se colocan generalmente a 45° (Figura 5.14).

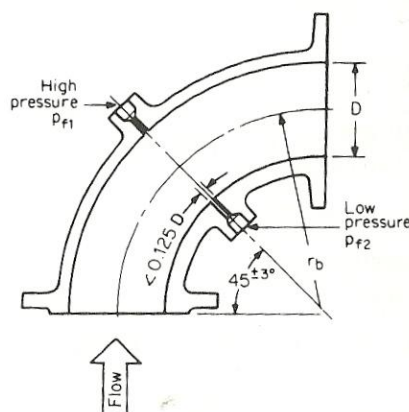


Figura 5.14 Medidor de codo con las tomas de presión a 45° [9]

Este tipo de medidores son baratos, pues se pueden aprovechar los codos existentes en una instalación. Además, presenta la ventaja de no presentar una obstrucción en el paso del fluido. No obstante, pueden ser imprecisos debido a que se genera muy poca diferencia de presión entre las dos tomas de presión.

5.5.1.5. Medidores de placa

Los medidores de placa (*target flowmeter* en inglés) consisten en una placa circular que se mantiene en el centro de la tubería por medio de una barra en perpendicular a la dirección del flujo (dispositivo primario) [9]. El flujo golpea la placa y desplaza la barra. La fuerza generada se detecta con un dispositivo secundario, compuesto generalmente por un transmisor neumático de equilibrio de fuerzas o bien un transductor eléctrico de galgas extensiométricas.

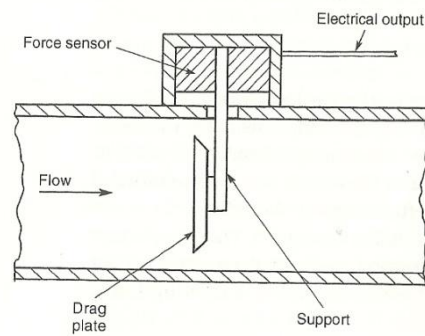


Figura 5.15 Medidor de placa (target flowmeter) [15]

Se aplican para la medida tanto de líquidos, gases y vapores. Además, su utilización en tuberías en disposición horizontal y la posición de la placa en el centro de la misma permiten el paso de condensados y materiales extraños por la parte inferior. No precisan de conexiones para la medición de la presión diferencial. El margen de caudal se puede graduar cambiando el tamaño de la placa y para evitar paradas se puede aislar el medidor con una derivación.

Sus principales desventajas incluyen una baja precisión, sensibilidad a vibraciones externas, residuos de fluido en la placa, la necesidad de frecuentes y cuidadosas calibraciones y ser un medidor intrusivo para el paso del fluido [13].

5.5.1.6. Tubo Pitot

En su forma más sencilla, consiste en un tubo pequeño con la entrada orientada en contra del sentido del flujo. En la entrada del tubo, la energía cinética del fluido se convierte en energía de presión, lo que da lugar a una diferencia de presión entre el interior y el exterior del tubo.

La diferencia de presión, ΔP , se puede obtener aplicando Bernoulli, siendo la ecuación:

$$\Delta P = \frac{1}{2} k \rho v^2$$

donde k es un factor de corrección que, en el caso ideal, es igual a la unidad.

La diferencia de presión se obtiene con un manómetro, con una toma en el tubo y otra en el exterior. En la práctica, se usan dos tubos concéntricos, como se ve en la **Figura 5.16**: el interior actúa como tubo pitot, midiendo la presión total, mientras que el exterior sirve de medio para medir la presión estática.

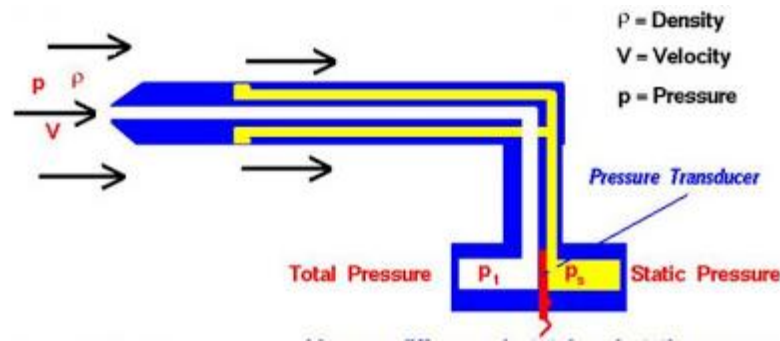


Figura 5.16 Tubo Pitot con dos tubos concéntricos: el interior mide la presión total, mientras que el exterior mide la presión estática [16]

Aplicaciones, ventajas y desventajas

Generalmente se usa el tubo pitot para la medida de velocidad de gases, como el aire, en tuberías largas.

Los tubos pitots son medidores sencillos y baratos, disponibles en muchos tamaños y de fácil utilización.

Su principal inconveniente es la dificultad de medir velocidades bajas, mientras que a velocidades altas de gas, la compresibilidad del gas causa efectos en la medición.

5.5.2. Medidores de área variable

Principio de operación

Al contrario de los medidores vistos hasta ahora, en los que el principio de operación es la presión diferencial, los medidores de área variable (o rotámetros) basan su funcionamiento en mantener una presión constante que permite aumentar el área eficaz de flujo con el caudal. Consisten en un tubo cónico de eje vertical y un flotador. En la **Figura 5.17** se muestra un diagrama de su principio de operación: el flujo se hace pasar en sentido ascendente a través del tubo y a medida que el flujo varía, el flotador sube o baja por el tubo, hasta un punto en el que la sección anular de paso entre el tubo y el flotador es suficiente para permitir el paso del flujo. La altura del flotador da información sobre la cantidad de flujo.

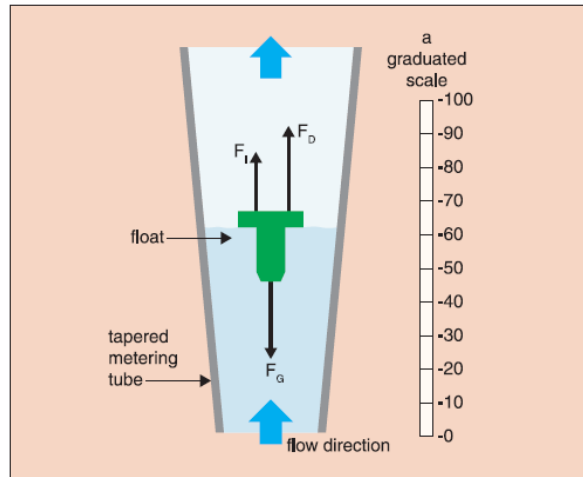


Figura 5.17 Medidor de área variable: diagrama de funcionamiento [13]

La presión diferencial se mantiene constante a través del flotador, debido al equilibrio entre las fuerzas de flotabilidad y la fuerza gravitatoria y la altura del flotador varía para obtener el área que satisface la ecuación de Bernoulli.



Figura 5.18 Rotámetros comerciales con diferentes rangos de medida (fabricante Malema Sensors) [17]

En el medidor más simple de área variable el tubo suele fabricarse de vidrio de boro silicato transparente, y se usa en condiciones de presión y temperatura de hasta 2400 kPa y 205°C, respectivamente. Si se trabaja en condiciones más severas de presión y temperatura (hasta 5000 kPa y 540 °C), el tubo se fabrica de metal (acero, hierro y otros metales). Al ser opaco, no es posible su visualización y medición directamente sobre el tubo. En estos casos, la posición puede detectarse mediante un dispositivo electromagnético situado en el exterior

del tubo, y se visualizará sobre un visualizador externo.

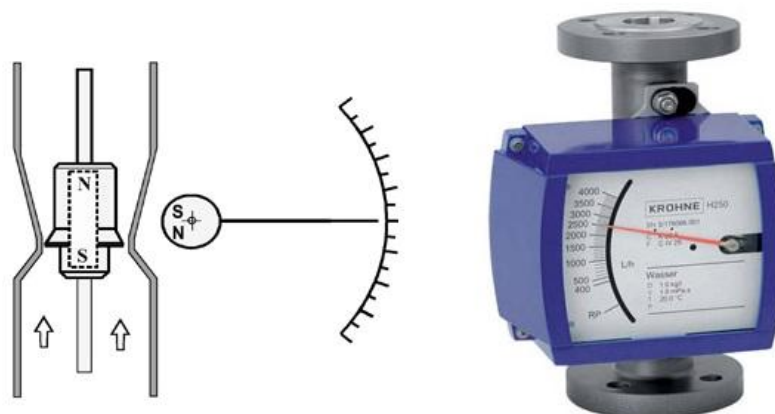


Figura 5.19 Rotámetro con detector electromagnético: a la izquierda, diagrama del principio de operación; a la derecha, rotámetro electromagnético comercial (fabricante KROHNE)[11] [18]

Los flotadores pueden ser guiados o no guiados y con diferentes geometrías, además de ser fabricados de diferentes materiales. En la **Figura 5.20** se muestran los diferentes tipos de flotadores.

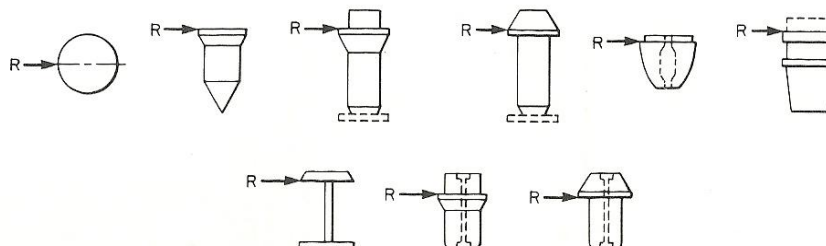


Figura 5.20 Tipos de flotadores. La línea de "R" marca el lugar donde se realiza la lectura [5]

Aplicaciones, ventajas y desventajas

Los medidores de área variable se utilizan en una gran variedad de líquidos y gases como aire, acetileno, amoníaco, argón butano, gas natural, helio, vapor y oxígeno. A pesar de esta variedad, los rotámetros se calibran específicamente para un fluido y, en el caso de ser utilizados con otros fluidos de densidad y viscosidad diferente se aplica un factor de corrección.

Su utilización se incluye en la industria química, farmacéutica, alimentaria, en plantas de tratamiento de aguas, en refinerías, etc [5][9].

Los rotámetros se utilizan en vertical, lo cual merece una especial consideración en su instalación. Típicamente, su rango de flujos es de 10:1, y son especialmente utilizados en aplicaciones con caudales bajos.

5.5.3. Medidores por accionamiento mecánico

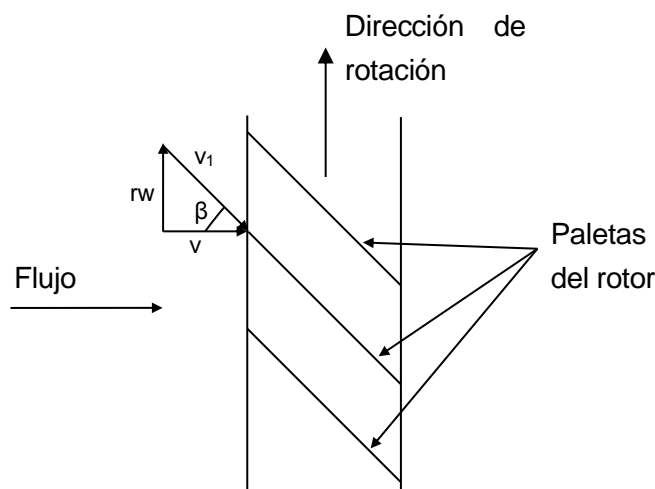
En este capítulo se muestran aquellos medidores que para la medición de caudal constan de un accionamiento mecánico, generalmente de tipo rotativo.

5.5.3.1. Medidores de Turbina

Principio de operación

El uso de espirales, molinos y hélices tiene una larga historia en su uso como medidor de velocidad. A finales del siglo XIX Reinhard Woltmann desarrolló un ventilador multi-pala para medir el flujo en los ríos [5]. Los primeros medidores modernos se desarrollaron en Estados Unidos, y fueron utilizados en la medición del flujo de fuel en aplicaciones aéreas.

El medidor de turbina consta de una longitud de tubo o tubería en el centro de la cual hay un rotor de paletas múltiple acopladas a un eje. Con el paso del fluido, la energía cinética del mismo hace girar el rotor con una velocidad proporcional a la velocidad media del fluido, y la velocidad se detecta con un detector externo magnético o de otro tipo. La relación lineal entre la velocidad lineal y la velocidad del rotor se mantiene en un amplio rango de caudales de 10:1 o incluso 20:1.



De la figura se deduce:

$$\tan \beta = \frac{rw}{v}$$

β : ángulo de la paleta del rotor

r : radio del rotor

w : velocidad angular del rotor

v : velocidad media del fluido

Por lo tanto, en términos de caudal:

$$Q_v = \frac{rAw}{\tan \beta} = Kw$$

siendo A el área de la sección transversal del flujo y K es una constante.

Su uso puede ser tanto para líquidos como para gases. Teniendo en cuenta las diferencias de densidad y viscosidad entre ambos, existen dos diseños de medidor de turbina diferentes.

Medidores de turbina para líquidos

El primer componente esencial de este medidor es el rotor en sí mismo, formado por paletas helicoidales o en forma de T. Se utilizan cojinetes de bolas o lisos dependiendo del fluido. Para líquidos limpios se utilizan cojinetes de bolas de acero inoxidable o de otros materiales con propiedades lubricantes entre -50°C y 250°C. Para líquidos en general, se utilizan generalmente cojinetes lisos de carburo de tungsteno, apropiados para temperaturas de hasta 400°C.

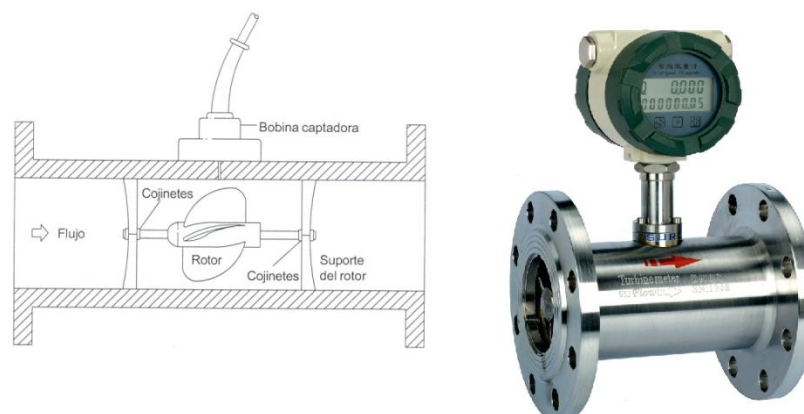


Figura 5.21 Medidor de turbina para líquidos: a la izquierda, diagrama de un medidor de turbina [11] a la derecha, un medidor de turbina comercial (fabricante Fueling Equipment [19])

Los dispositivos de detección más utilizados son los magnéticos o de reluctancia por razones económicas. En los medidores que incorporan estos detectores, la velocidad viene

determinada por el paso de las paletas individuales a través de un campo magnético creado por un imán permanente montado en una bobina exterior. El paso de cada paleta hace variar la reluctancia del circuito magnético, variando el flujo inducido en la bobina y produciéndose así una corriente alterna proporcional a la velocidad de la turbina. En otros casos se utilizan dispositivos de carrera modulada para la detección de flujos más lentos o de menor densidad.

Uno de los inconvenientes que presentan los medidores de turbina para líquidos es su aplicación en fluidos viscosos. La viscosidad resulta en una disminución de velocidad en el fluido.

Otro inconveniente que presenta es la cavitación. La cavitación se causa en un punto donde la presión local cae por debajo de la presión de vapor y el flujo resulta en un flujo de dos fases, incrementando el volumen y causando una lectura errónea. Para evitar que se produzca cavitación, se recomienda que la presión aguas abajo del medidor sea de al menos 1 bar por encima de la presión atmosférica.

Una de las ventajas que presenta es su elevada exactitud, del orden de $\pm 0.3\%$.

En lo que refiere a su instalación, el factor a tener en cuenta es su longitud aguas arriba y aguas abajo del medidor. Es una de las fuentes de error más comunes en el uso de medidores de turbina. La mayoría de fabricantes recomienda que aguas arriba del medidor haya un tramo de tubería recta de mínimo 10 diámetros, y otro tramo de tubería recta de mínimo 5 diámetros aguas abajo del medidor.

Medidores de turbina para gases

Muchos de los comentarios que conciernen a los medidores para líquidos son iguales para los medidores para gases, aunque se observan diferencias en su diseño.

Los medidores para gases suelen tener un rotor con un gran núcleo central mayor al del medidor de turbina para líquidos, como se ve en la **Figura 5.22**, dejando menos espacio para el paso del flujo, lo que provoca que el gas se acelere y concentre su fuerza motriz en el perímetro de las paletas, donde generan el máximo par posible.

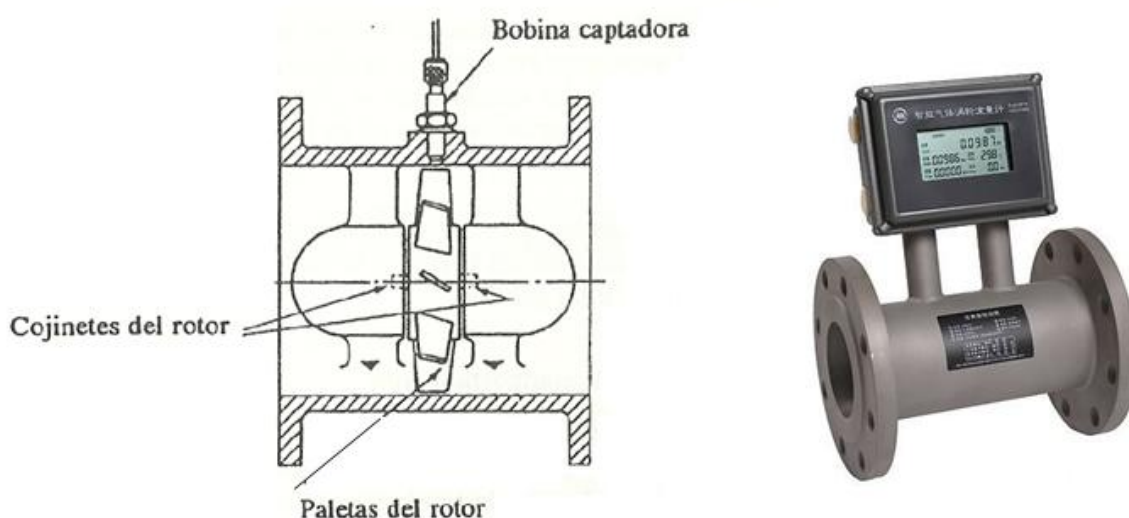


Figura 5.22 Medidor de turbina para gases: a la izquierda, diagrama de un medidor de turbina [11]; a la derecha, un medidor de turbina comercial (fabricante Fueling Equipment [19])

Se suelen utilizar cojinetes de bolas. Los rotores suelen fabricarse de Delrin o aluminio, o incluso acero inoxidable en algunas aplicaciones. En cuanto al rango de medida, pueden ofrecer rangos de 30:1 algunos tipos de medidores. Dependiendo del diámetro, los rangos pueden diferir. Típicamente, se utilizan entre 12 y 24 paletas. Son capaces de soportar presiones de hasta 100 bar, y tienen una pérdida de presión de aproximadamente 5,5 mbar. Son instrumentos precisos, cuyo valor típico de incertidumbre es de un $\pm 2\%$, y con una repetibilidad del 0,02%. La máxima velocidad puede ser de hasta 30 m/s.

Aplicaciones, ventajas y desventajas

El medidor de turbina suele ser utilizado en aplicaciones donde se demanda precisión y donde se necesita medir un amplio rango de caudales. En concreto, para líquidos y gases limpios, e incluso algunos fabricantes ofrecen soluciones para vapor [20]. La turbina queda limitada por la viscosidad del fluido, como se ha visto anteriormente

Se utiliza en industrias del petróleo y del gas, agua, química, de la energía, alimentaria, aeroespacial, farmacéutica, etc.

5.5.3.2. Medidores de desplazamiento positivo

Principio de operación

Los medidores de desplazamiento positivo basan su funcionamiento en dividir el volumen total que fluye por ellos en volúmenes fijos más pequeños, para acabar sumándolos. La idea es tener volúmenes conocidos, y para ello, en los diseños que se describen en adelante

suelen haber tres componentes:

- Compartimento, que se llena de fluido.
- Desplazador, que transfiere el volumen al siguiente compartimento.
- Mecanismo que mide cuantas veces se mueve el desplazador.

Hay varios diseños, tanto para líquidos como para gas, de los cuales, la mayoría de ellos en uso desde hace más de 100 años. A continuación se mostrarán los diseños dedicados a la medición de líquidos.

5.5.3.2.1 Medidores de tipo pistón oscilante

Consta de una cámara dentro de la cual hay un cilindro y un pistón montados excéntricamente. Un ciclo de funcionamiento se puede observar en la **Figura 5.23**. El pistón oscila alrededor del cilindro separando la entrada y la salida del fluido. Cuando el fluido entra por la entrada A, desplaza el pistón a girar alrededor del cilindro, hasta llenarse completamente y llegar a la salida B, quedando listo para empezar un nuevo ciclo.

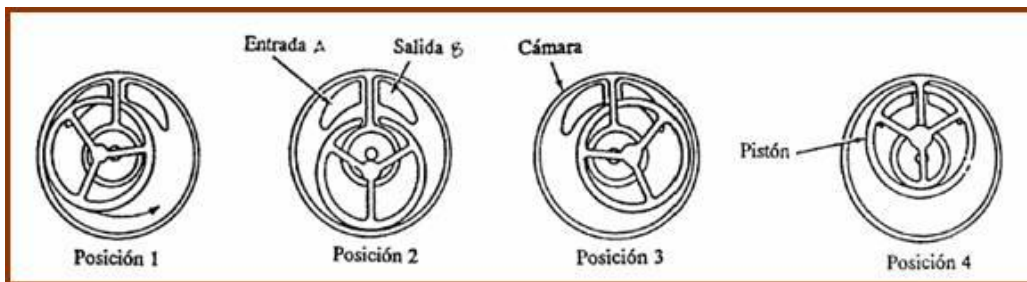


Figura 5.23 Medidor de pistón oscilante: posición 1: el líquido entra por la entrada A; posición 2: el pistón se mueve alrededor del cilindro; posición 3: el pistón se sigue desplazando hacia la salida B; posición 4: el fluido sale forzado por la salida B [21]

5.5.3.2.2 Medidores helicoidales (multirotor)

En la **Figura 5.24** se muestra un diagrama de medidor helicoidal con dos rotores estriados. El fluido entra en el medidor, forzando a los rotores a girar y llenando los compartimentos hasta llegar a la salida.

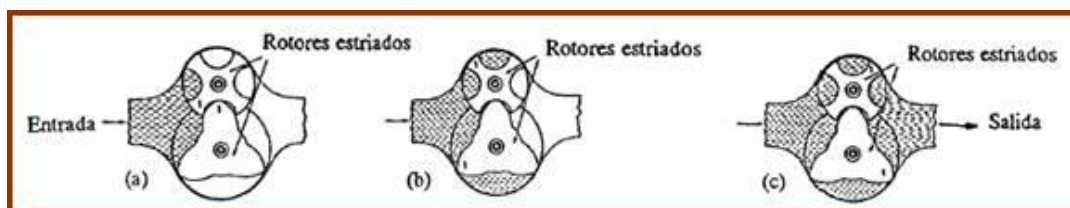


Figura 5.24 Medidor helicoidal (multirotor) [21]

5.5.3.2.3 Medidores de rueda oval

El funcionamiento es igual al de los medidores helicoidales, pero en este caso, en lugar de rotores estriados hay dos ruedas ovales que engranan entre si y que giran debido al paso del fluido, como se observa en la **Figura 5.25**.

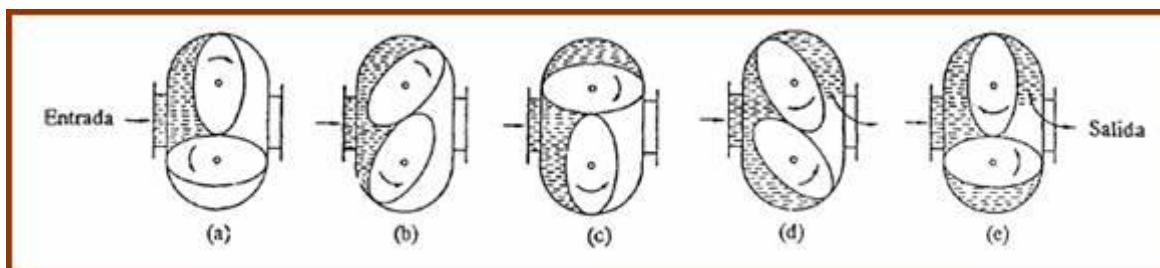


Figura 5.25 Medidor de rueda oval [21]

5.5.3.2.4 Medidores de disco giratorio

Consisten en un disco atrapado por una bola de rodamiento central y un eje axial, como se observa en la **Figura 5.26**. El fluido que entra fuerza al disco a rotar sobre el rodamiento, y el giro forma dos compartimentos cerrados que atrapan un volumen fijo conocido.

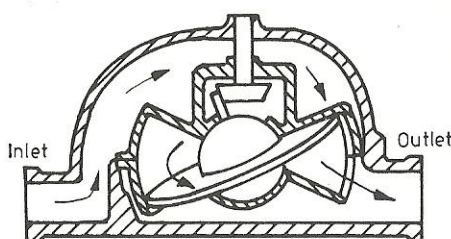


Figura 5.26 Medidor de disco giratorio [5]

5.5.3.2.5 Medidores de paletas deslizantes

Como se muestra en la **Figura 5.27**, consta de un rotor con unas paletas dispuestas en parejas opuestas que se deslizan libremente hacia adentro y hacia afuera de su alojamiento. Las paletas opuestas están conectadas mediante varillas, por lo que cuando una paleta está adentro de su alojamiento, la opuesta se coloca hacia afuera, y viceversa. La presión del paso del fluido y la fuerza centrífuga actúan sobre las paletas y generan el movimiento del rotor. Cuando la paleta está hacia afuera y toca la pared provoca el cierre, de manera que se generan pequeños compartimentos cerrados entre las dos paletas consecutivas que están desplazadas hacia afuera. Así, el número de revoluciones del rotor determina la cantidad de líquido que pasa por el medidor y, por lo tanto, sirve para la medición de caudal.

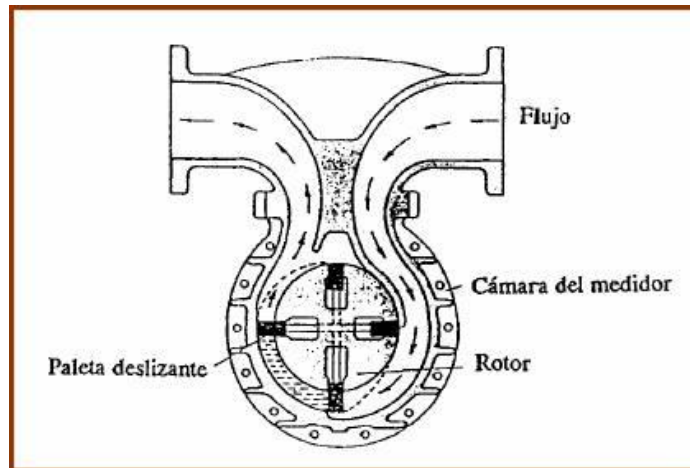


Figura 5.27 Medidor de paletas deslizantes [21]

Estos medidores son los más precisos dentro de la familia de dispositivos medidores de desplazamiento positivo.

5.5.4. Medidores oscilatorios

A continuación se van a tratar los dispositivos fundamentales cuya técnica de medición se basa en oscilaciones del fluido.

5.5.4.1. Medidores por formación torbellino

Principio de operación

Los torbellinos se producen al situar un cuerpo sólido o barrera en la corriente del gas o líquido. El fluido divide su camino en dos y esto genera una inestabilidad. Esta inestabilidad provoca la aparición de torbellinos a un lado y otro del cuerpo de forma alternada, a una frecuencia linealmente proporcional a la velocidad [9].

Una forma sencilla de explicar la aparición de torbellino es la inclusión de un cuerpo sólido cilíndrico. A causa de la viscosidad del fluido, la capa límite tiende a circular a lo largo de la superficie del cuerpo, moviéndose más lenta que las capas más exteriores. Esto hace que a caudales elevados, estas dos capas se separen, formándose los torbellinos, mientras que para caudales bajos (números de Reynolds pequeños) la diferencia de velocidad entre las dos capas no es suficiente para separarlas. Como se ve en la **Figura 5.28**, hasta un número de Reynolds de 40, las capas de fluido se mantienen juntas sin desprenderse, siendo simétrico el paso del fluido a ambos lados del cuerpo cilíndrico. A partir de 40, las capas límite y exterior empiezan a separarse y comienza la formación de torbellinos.

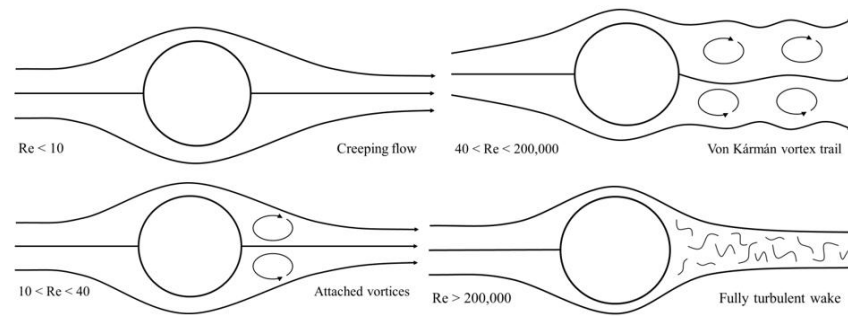


Figura 5.28 Formación de torbellinos alrededor de un cuerpo cilíndrico [22]

Antes de completarse el primer torbellino a un lado del cuerpo, un segundo torbellino empieza a formarse al otro lado del cuerpo. Este segundo torbellino corta al primero para su completa formación, dejándolo irse aguas abajo del cuerpo sólido. Si el flujo y la formación de torbellinos son estables, el tiempo de formación del segundo torbellino es igual al del primer torbellino. Este patrón repetido de forma alternada a lado y lado del cuerpo se le conoce como *calle de torbellinos de von Karman* (*von Karman vortex street*), y se puede observar en la **Figura 5.29**.



Figura 5.29 Von Karman Vortex Street (calle de torbellinos de von Karman) [23]

Strouhal (1878) [9] realizó un primer estudio experimental, donde mostraba que la frecuencia de formación de torbellinos estaba relacionada con el diámetro de la barrera y la velocidad del fluido. De aquí nació una relación adimensional conocida como el número de Strouhal:

$$S = \frac{f \cdot h_f}{v}$$

S : número de Strouhal;

f : frecuencia de formación de torbellinos;

h_f : diámetro de la barrera (o amplitud en casos de cuerpos no cilíndricos);

v : velocidad del fluido alrededor de la barrera.

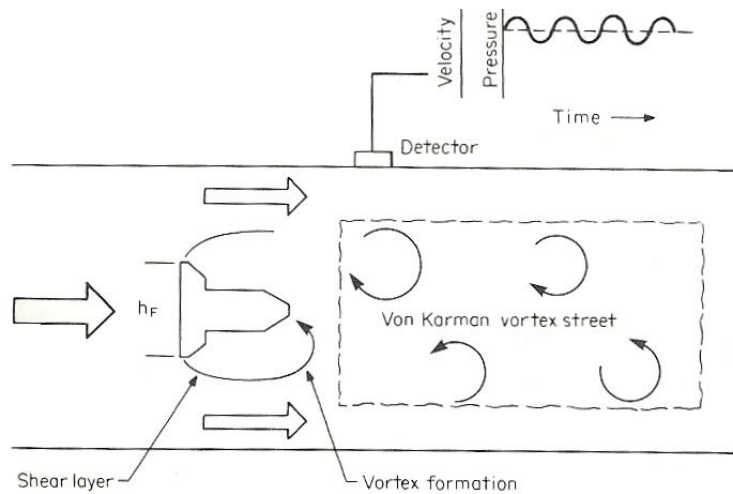


Figura 5.30 Formación de torbellinos [9]

Medidores industriales

Los medidores industriales se componen de 3 partes fundamentales: un cuerpo de obstrucción (o barrera) que genera los torbellinos, un sensor que convierte la energía de los torbellinos en una señal eléctrica, y un transmisor para amplificar y acondicionar la señal generada.

Cuerpo de obstrucción

La frecuencia de generación de torbellinos es un factor dependiente de la anchura y de la longitud de la barrera. Para determinar esta relación se define el factor K como:

$$K = \frac{f}{Q_v} = \frac{\text{pulsos}}{\text{unidad de volumen}}$$

Para cada geometría, y de manera experimental, se ha determinado una relación entre el ratio entre anchura y longitud del cuerpo de obstrucción (h_F/D) y el factor K . Zanker y Cousins (1975) determinaron el valor óptimo de h_F/D para diferentes geometrías, siendo el valor óptimo aquel que minimiza el valor de K y, por lo tanto, minimiza también la frecuencia de formación de torbellinos, lo cual implica un perfil más uniforme aguas arriba del cuerpo de obstrucción (**Figura 5.31**) [5].

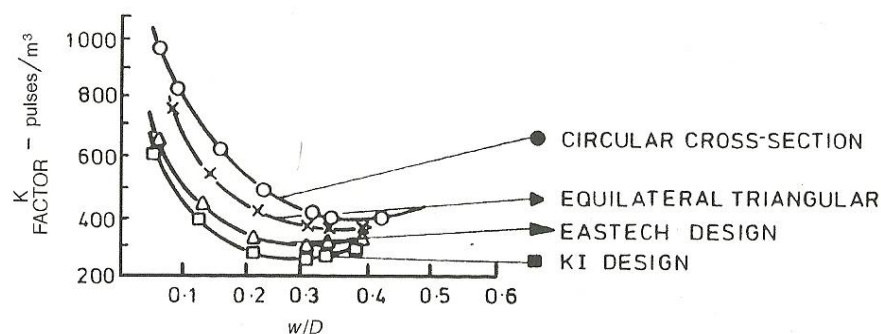


Figura 5.31 Valor óptimo de h_f/D para diferentes geometrías. En la imagen, w representa h_f [5]

Existen varios tipos de geometrías para los cuerpos de obstrucción, como se ve en la **Figura 5.32**.

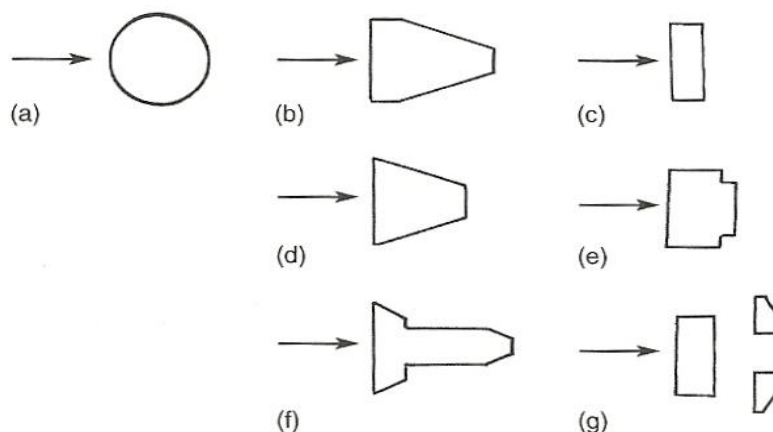


Figura 5.32 Diferentes geometrías de cuerpos sólidos de obstrucción [5]

Sensor

Uno de los primeros dispositivos consistía en un cuerpo de obstrucción que era un electroimán cilíndrico, y vibraba con el paso del flujo. Esta vibración se convertía en una señal eléctrica proporcional al caudal. No obstante, estas vibraciones alteraban la naturaleza de la formación del torbellino. Otro tipo de sensor utilizado posteriormente consistía en la variación de temperatura entre dos termistores adjuntos a la cara aguas arriba del cuerpo de obstrucción.

Una variante de este último dispositivo consiste en sustituir los termistores por un haz de ultrasonidos transversal. Los torbellinos interrumpen este haz, produciendo una oscilación en la tensión medida por el receptor, consiguiendo una buena linealidad y rango de medida de 30:1, ligeramente superior al típico para este tipo de medidores.

Aplicaciones, ventajas y desventajas

Este tipo de medidores suelen utilizarse en industrias del agua, aunque también en industria química y petroquímica. También se utiliza en aplicaciones con gases y vapores.

Algunas de las ventajas que ofrecen los medidores de torbellinos es que tienen una linealidad con un error de entre el 0,5% y el 1% en un rango de 20:1, e incluso con los medidores más actuales este rango puede aumentar hasta 40:1 para líquidos. Típicamente, la velocidad mínima que pueden detectar es de entre 0,3 y 0,6 m/s para líquidos. Son medidores que dan alta precisión para caudales elevados y ofrecen ciertas ventajas con respecto a los medidores de presión diferencial, como no tener partes móviles o pequeñas pérdidas de presión.

Por el contrario, son medidores que no pueden medir caudales bajos

5.5.4.2. Medidores por formación de remolinos

En la **Figura 5.33** se muestra un diagrama sobre este tipo de medidor. Consiste en unos álabes en forma helicoidal que provocan la aparición de remolinos y que giran con el paso del fluido. Además, en la entrada sufre una contracción, lo que hace aumentar la velocidad angular de los álabes. En la zona central, anterior a la expansión, hay un sensor. Cada paso de la hélice es medido por el sensor, y la frecuencia de esta rotación está relacionada linealmente con el caudal volumétrico.

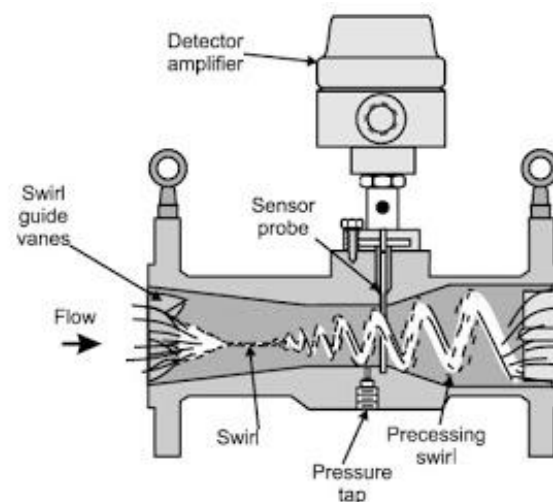


Figura 5.33 Diagrama sobre un medidor por formación remolinos (swirl meter) [24]

Otro tipo de sensor utilizado para medir el caudal, y más actual, consiste en colocar dos tomas de presión diametralmente opuestas. En este caso, la diferencia de presión se relaciona con el caudal. En su mayoría, el material en contacto con el fluido es acero inoxidable.

Aplicaciones, ventajas y desventajas

Este medidor puede ser utilizado en aplicaciones con gases húmedos o sucios y líquidos. Tiene aplicaciones con agua, agua residual, condensados, gasolina, aire, CO₂, gas natural, etileno y vapor.

Igual que ocurre con los medidores por formación de torbellinos, los medidores por formación de remolinos no son aptos para la medición de caudales bajos, teniendo su rango de medición más bajo en alrededor de 0,2 a 2 m³/h.

5.5.5. Medidores electromagnéticos

Principio de funcionamiento

Los medidores electromagnéticos aparecen por primera vez en la industria en los años 50. Foxboro obtuvo la primera patente y los primeros dispositivos aparecieron en 1954.

Este tipo de medidores se basan en los principios de inducción magnética generada por un conductor que atraviesa un campo magnético.

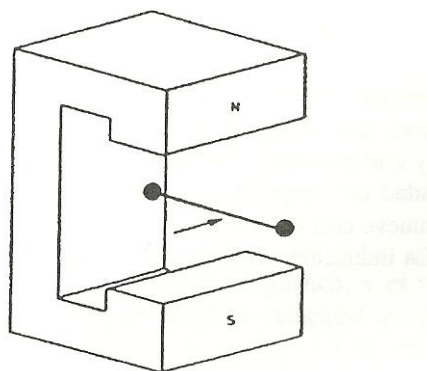


Figura 5.34 Conductor en movimiento a través de un campo magnético [11]

Cuando un conductor atraviesa un campo magnético, como el generado por un imán como el de la **Figura 5.34**, se genera una tensión U entre sus extremos proporcional a la longitud l del conductor y al flujo magnético generado B .

$$U = Blv$$

Este principio se puede trasladar a una tubería para obtener los medidores electromagnéticos. El fluido circula a través de la tubería o del tubo y un campo magnético es creado a través de la misma, generalmente por bobinas. Cabe mencionar que para que para funcionar, el fluido debe actuar como conductor, por lo que debe tener una conductividad de al menos 2μS/cm. El tubo se fabrica de material no magnético para permitir el paso del campo magnético, y está aislado eléctricamente. Dos electrodos se

sitúan diametralmente opuestos en la pared interior del tubo, quedando en contacto con el fluido. La diferencia de potencial que se obtiene entre estos dos electrodos tiene la siguiente expresión:

$$\Delta U = BDv_m$$

ΔU : diferencia de potencial entre los electrodos,

B : campo magnético,

D : diámetro de la tubería o del tubo,

v_m : velocidad media del fluido a través del campo magnético.

Esta ecuación permite conocer la velocidad media del fluido y, por tanto, el caudal volumétrico. No obstante, esta expresión es válida para campos magnéticos uniformes y perfiles de velocidad axialmente simétricos, lo cual no ocurre a la perfección en la realidad.

Diseño del medidor electromagnético

En la **Figura 5.35** se muestra un esquema de un medidor electromagnético. Consta de dos partes: un dispositivo primario y un dispositivo secundario.

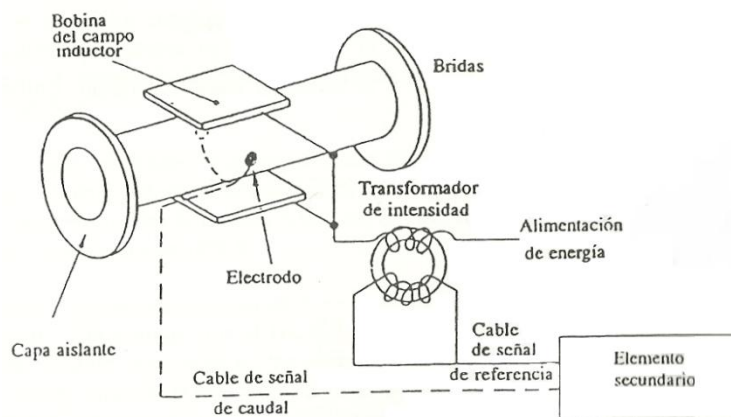


Figura 5.35 Diagrama de un medidor electromagnético [11]

Dispositivo primario

En primer lugar, consta de un tubo medidor. Es un tramo de tubería fabricada de material no magnético para permitir el paso del campo magnético y aislado eléctricamente, bridado en sus extremos para ser incluido en cualquier instalación. Está disponible en multitud de diámetros, desde 2 mm hasta 3000 mm.

En segundo lugar, consta de unas bobinas que generan el campo magnético, situadas en el exterior del tubo.

Los dos electrodos se sitúan en el interior. Al estar en contacto con el fluido, deben de ser compatibles con las propiedades químicas del fluido. Entre los materiales más utilizados se encuentran acero inoxidable, iridio/platino, titanio y circonio.

Dispositivo secundario

La diferencia de potencial entre los electrodos es del orden de milivoltios, por lo que debe ser ampliada para poder ser utilizada en el margen de los instrumentos receptores de la señal. Para ello se usa un convertidor, que además de amplificar, rechaza señales falsas generadas por fuentes externas y compensar la señal del caudal por variaciones del campo magnético.

Para la instalación de este tipo de medidores es importante tener en cuenta la proximidad de cables eléctricos de alta tensión u otro tipo de señales eléctricas próximas, las cuales podrían inducir a la aparición de señales de caudal falsas.

Algunos de estos medidores tienen electrodos más grandes que la mayoría, de una longitud aproximada de 0,8 veces el diámetro de la tubería. La finalidad de esta variante es conseguir un medidor que se comporte mejor ante variaciones del perfil de flujo. No obstante, la mayor superficie de los electrodos hace que aparezcan más incrustaciones, que pueden derivar en una lectura falsa de caudal.

Aplicaciones, ventajas y desventajas

Los medidores electromagnéticos se utilizan con líquidos con conductividades eléctricas de $1\mu\text{S}/\text{cm}$ o mayor, ya sean limpios o con sólidos, sucios, abrasivos y aguas residuales. Esta gran variedad se debe a que se trata de un tipo de medidor no intrusivo. Las principales industrias donde se aplica su uso son las del papel y del suministro de agua potable.

Sus ventajas principales incluyen su señal de salida lineal, su amplio rango de tamaños, ser medidores no intrusivos (siendo aptos para fluidos con partículas en suspensión), no se ven afectados por variaciones de densidad, viscosidad, presión y temperatura y no dan lugar a pérdidas de carga.

Entre sus inconvenientes principales se encuentra la necesidad de que el fluido tenga una cierta conductividad eléctrica, no alcanzan una gran precisión en grandes rangos de caudal en comparación a otro tipo de medidores y su coste elevado.

5.5.6. Medidores ultrasónicos

La idea de usar ultrasonidos para la medida de caudal apareció en una patente alemana en 1928. No obstante, la idea cobró importancia años más tardes, en la segunda mitad de siglo con la aparición de los transductores piezoeléctricos. El desarrollo de los medidores por ultrasonidos cobró interés porque con ellos es posible medir una amplia variedad de fluidos (gases y líquidos limpios o sucios), con una buena precisión y un amplio rango. Es un medidor lineal, que no supone una obstrucción en el fluido, no tiene piezas mecánicas que puedan sufrir desgaste, no genera pérdidas de carga y no están limitados por la conductividad del fluido como en el caso de los medidores magnéticos. Existen varios tipos de medidores ultrasónicos, entre los que destacan dos: medidores *Doppler* y medidores ultrasónicos de impulsos.

5.5.6.1. Medidores Doppler

Este tipo de medidor basa su funcionamiento en el efecto Doppler. Este efecto consiste en la variación de frecuencia que se da cuando el sonido rebota en un cuerpo en movimiento. En el caso de estos medidores, un haz de ultrasonidos es emitido hacia el fluido. Si el fluido está en reposo, el sonido rebota en las partículas a la misma frecuencia. Si, por lo contrario, el fluido está en movimiento, el sonido rebota en las partículas, que también están en movimiento y a la misma velocidad que el fluido, y es reflejado a una frecuencia diferente. En la **Figura 5.36** se muestra un diagrama del efecto Doppler.

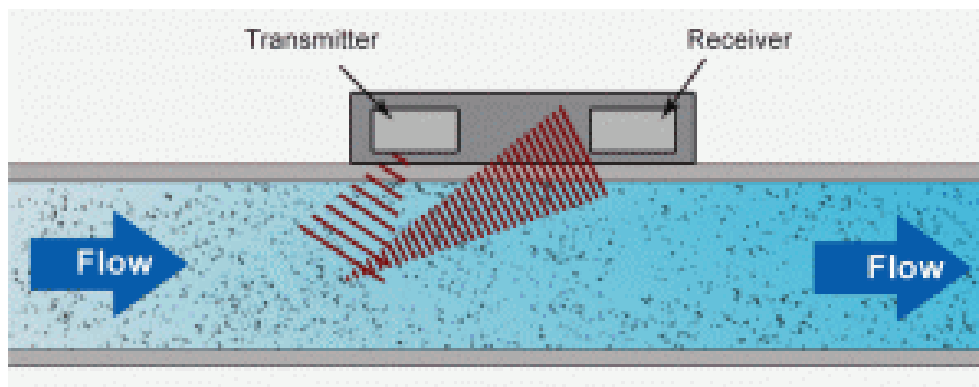


Figura 5.36 Diagrama del efecto Doppler [25]

Así pues, se puede relacionar esta variación en la frecuencia de los ultrasonidos con la velocidad mediante la siguiente expresión:

$$\Delta f = 2f_t \frac{v}{c} \cos \theta$$

Δf : diferencia entre la frecuencia del receptor, f_r , y la frecuencia del transmisor, f_t ,

f_t : frecuencia del transmisor,

v : velocidad del fluido en el tubo o tubería,

c : velocidad del sonido en el fluido,

θ : ángulo de incidencia del haz de ultrasonidos con respecto a la dirección del flujo.

La señal que se transmite para realizar la medida es entonces la variación de frecuencia.

Transductor piezoeléctrico

El transductor piezoeléctrico puede ser individual o doble. El individual consiste en que el transductor actúa al a vez como transmisor y como receptor, lo que permite una instalación más sencilla. El doble consiste en separar en dos transductores el transmisor y el receptor, lo que permite obtener un mejor resultado, pero tiene la desventaja de ser más difícil alinear transmisor y receptor.

El transmisor de ultrasonidos se coloca en el exterior de la tubería o del tubo, por lo que debe asegurarse de que el material del que se construye permita la propagación de los ultrasonidos. Hormigón, hierro o el acero inoxidable, por ejemplo, presentan problemas para permitir el paso de los ultrasonidos a través de ellos.

Aplicaciones ventajas y desventajas

Sus usos más particulares engloban las aplicaciones sanitarias y la protección de bombas como interruptor de bajo caudal parando la bomba por falta de fluido.

Son efectivos para fluidos con partículas, fluidos sucios, y pueden ser utilizados también en fluidos limpios, lo que lo hace muy versátil.

5.5.6.2. Medidores de tiempo de vuelo

En este caso, transmisor y receptor se colocan diagonalmente uno a cada lado de la tubería, como se ve en la **Figura 5.37**.

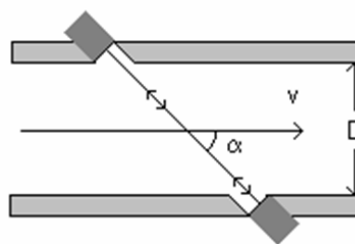


Figura 5.37 Diagrama caudalímetro de tiempo de vuelo [12]

El transmisor genera un haz de ultrasonido por impulsos a una determinada frecuencia y se mide el tiempo que la onda tarda en llegar al receptor.

En este caso, la expresión que permite obtener la velocidad del fluido es:

$$v = \frac{c^2 \tan \alpha}{2D} \Delta t$$

v: velocidad del fluido,

c: velocidad del sonido en el fluido,

α : ángulo del haz de ultrasonidos respecto a la dirección del flujo,

D: diámetro de la tubería o del tubo,

Δt : tiempo de vuelo del haz desde el transmisor hasta el receptor.

Esta relación permite obtener de manera directa el caudal.

Aplicaciones, ventajas y desventajas

Se trata del medidor de ultrasonidos más preciso. Se utiliza en la medición de líquidos limpios y gases, aunque también para aquellos líquidos que presenten partículas. Presenta la ventaja de ser un medidor no intrusivo.

5.5.7. Medidores térmicos para líquidos

El funcionamiento de este tipo de medidores se basa en el incremento de la temperatura del fluido al aplicar una cierta cantidad de calor [26]. La medición, no obstante, no es de caudal volumétrico, sino de caudal másico, y se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q_m = \frac{q}{c_p \Delta T}$$

Q_m : caudal másico,

q: calor,

c_p : calor específico,

ΔT : variación de temperatura.

El calor aplicado supone un incremento de temperatura, medido con dos termómetros, uno aguas abajo del calentador y otro termómetro aguas arriba como se indica en la **Figura 5.38**.

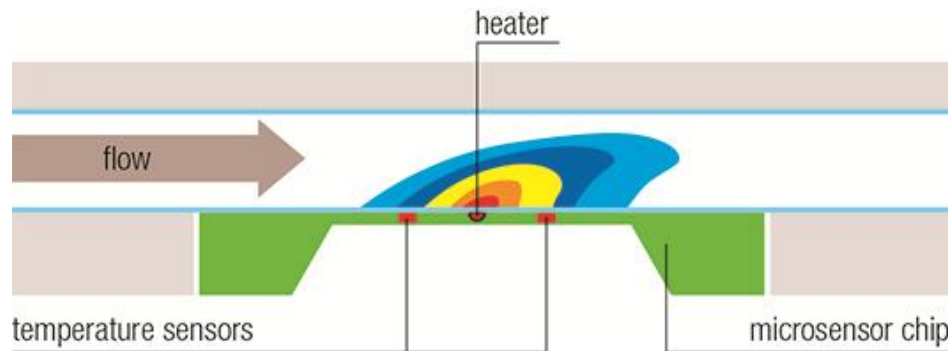


Figura 5.38 Diagrama del fabricante Sensirion de un medidor térmico para líquidos [27]

Aplicaciones, ventajas y desventajas

Los medidores térmicos son válidos para su uso en la medición de caudales muy bajos, muy recomendados para su uso tanto en laboratorio como para la medición de caudales bajos de líquidos tóxicos, corrosivos y volátiles. Otra de sus ventajas es que se trata de un medidor no intrusivo.

Permiten conexiones de tubería de entre 1/16 y 1/4 de pulgada. Pueden medir caudales de hasta 0.002 kg/h o incluso menores, con un máximo de hasta 0.5 kg/h aproximadamente. Su rango típico de medición es de 15:1 o 10:1, y presenta buena precisión, con valores típicos de entre 0.2% y 1%, y buena repetibilidad.

6. Estado del arte

En este trabajo, las condiciones de flujo son tales que la oferta de caudalímetros actualmente en fabricación es muy reducida. Dichas condiciones son la escala milimétrica de los tubos por los que pasa el fluido y su caudal, el cual es muy bajo. En concreto, los tubos son de 0,8 y 1 mm de diámetro interno, y el caudal de fluido que pasa por ellos es de entre 0.5 y 7.5 ml/min. Así pues, se trata de un flujo a escala milimétrica. Ante estas condiciones, una de las líneas de investigación para esta clase de flujos es la detección de conductividad por acoplamiento capacitivo sin contacto, o C⁴D (de las siglas en inglés de Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detection).

6.1. Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detection (C⁴D)

La técnica C⁴D consiste en la capacitancia generada entre dos conductores para detectar la conductividad de un fluido que circula entre los dos conductores, sin que éstos tengan contacto con el fluido [28].

Esta técnica fue originariamente desarrollada por Andreas J. Zemmann en un estudio sobre la detección de conductividad en electroforesis capilar [29] a la par que otro grupo de investigadores brasileños (José A. Fracassi da Silva, Norberto Guzman, Claudimir L. do Lago) [30]. Nació a raíz de la problemática para medir flujos en capilares, en los cuales los flujos son muy bajos y los diámetros internos son del orden de 50 µm.

En los primeros estudios realizados por Andreas J. Zemmann, el detector C⁴D consistía en dos tubos de metal cortos (máximo de 2 cm) separados por una distancia de unos 2 mm, y en medio de los mismos se encontraba el capilar. Los dos tubos actúan como electrodos y formaban un capacitor y, aplicando una onda de audio o de ultrasonidos se podían detectar cambios en la conductividad del líquido que circula a través del capilar.

Con los años han ido apareciendo nuevos diseños. En 2007, M. Pumera presentó un artículo donde se discutían diferentes diseños y aplicaciones de la detección de conductividad sin contacto para microfluidos [31]. Destaca el diseño del grupo de Wang, en 2002. Este diseño consistía en un microchip con un microcanal en la parte central y a todo lo largo del microchip en el que se colocaba el fluido. A cada lado de este microcanal se colocaban dos electrodos planos, como se observa en **Figura 6.1**, y se medía la impedancia de la solución en el microcanal de separación.

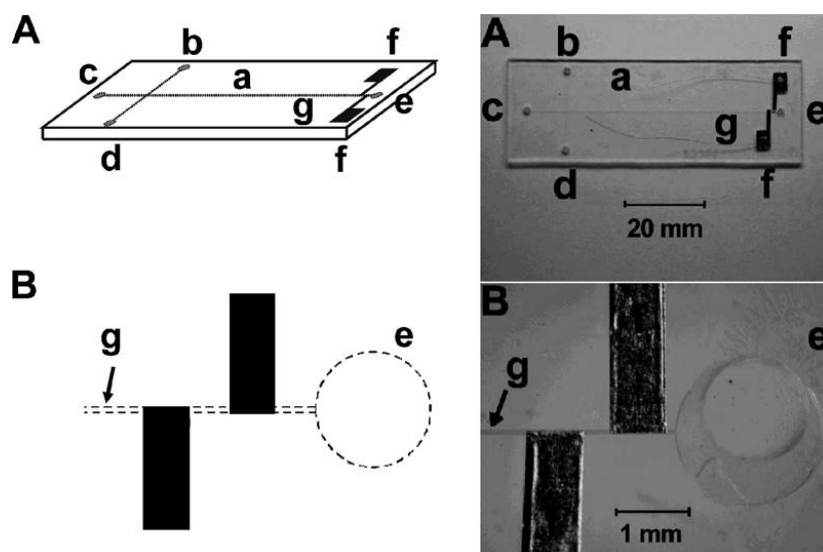


Figura 6.1 Microchip con C^4D ; a la izquierda un esquema, a la derecha la imagen; (A)(a) microchip, (b) depósito de muestra, (c) depósito de regulación, (d) depósito sin uso, (e) depósito de salida, (f) electrodos, (g) microcanal de separación. (B) vista del detector [31]

En 2013, Haifeng Ji, Zhiyao Huang y otros investigadores [32] empezaron a utilizar la técnica C^4D en combinación con el principio de correlación cruzada de medición de flujo para medir el flujo en tubos de escala milimétrica. Construyeron un sensor de C^4D de cinco electrodos cilíndricos de metal alrededor de un tubo aislado, con una fuente de corriente y un dispositivo de adquisición de datos. El esquema se observa en la **Figura 6.2**.

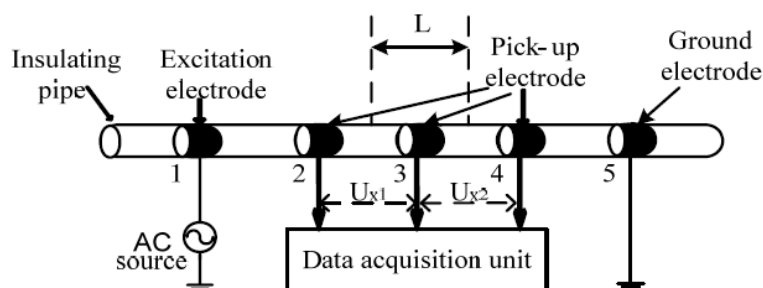


Figura 6.2 Sensor fabricado con 5 electrodos para obtener dos señales de conductividad [32]

Para entender mejor el funcionamiento del sensor se puede utilizar el circuito equivalente simplificado, que se puede ver en la **Figura 6.3**. $C_{x1} - C_{x5}$ son las capacitancias formadas por los cinco electrodos. $R_{x1} - R_{x4}$ son las resistencias equivalentes al fluido entre dos electrodos adyacentes. Cuando se aplica V_{in} , circula una corriente por el sistema, lo que permite obtener dos diferencias de potencial, U_{x1} y U_{x2} . Siendo la corriente que circula I , los valores de U_{x1} y U_{x2} son:

$$U_{x1} = IR_{x2}$$

$$U_{x2} = IR_{x3}$$

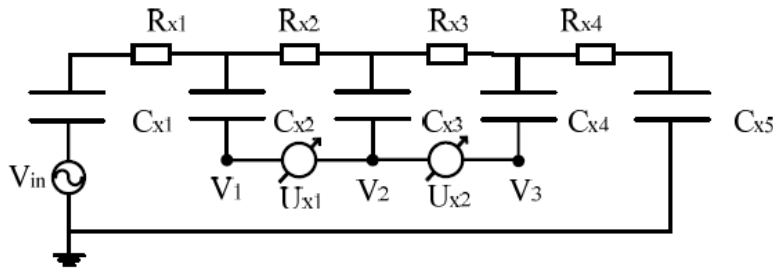


Figura 6.3 Circuito equivalente del sensor

Así pues, la diferencia de potencial U_{x1} contiene la información de conductividad entre los electrodos 2 y 3, mientras que U_{x2} da información entre los electrodos 3 y 4.

Obtenidas estas dos diferencias de potencial, y mediante el principio de correlación, se puede determinar el tiempo de retraso entre las dos señales y, conociendo la distancia entre el centro de la combinación de los electrodos 2 y 3 y el centro de la combinación entre los electrodos 3 y 4, es posible conocer la velocidad del fluido. Finalmente, conociendo la sección interior del tubo es posible determinar el caudal.

El equipo de investigadores realizó experimentos con tubos de diámetro interior de 0.5, 0.8, 1.8, 3.0 y 3.9 mm. En los experimentos realizados, la diferencia relativa entre el caudal de referencia proporcionado y el caudal medido fue inferior al 5%.

6.2. Método usando ultrasonidos

En 2001, M. Takamoto y un grupo de investigadores [33] desarrollaron un medidor ultrasónico muy pequeño para líquidos para medir en tubos de diámetro de hasta 0.5 mm. Para la realización del ensayo dos pistones de 6 mm de diámetro accionados por un motor controlado por ordenador. Los pistones actuaban de manera que cuando uno descargaba líquido, el otro cargaba. Como líquido, se usó agua pura. El motor era capaz de suministrar caudales entre 0.2 y 16 ml/min con gran estabilidad y precisión.

En los medidores de ultrasonidos se tiene un sensor que transmite y un sensor que recibe, que al excitarse o al recibir el ultrasonido, respectivamente, generar una señal oscilante. El problema de estos medidores para medir valores de caudal próximos al cero tiene que ver, entre otros motivos, en la dificultad de medir por parte de los equipos electrónicos el inicio de estas oscilaciones. Generalmente, se toma como inicio de la oscilación el momento inicial que es capaz de detectar el equipo electrónico. De esta manera, se puede determinar el tiempo de propagación que corresponde con el inicio de la oscilación del sensor que transmite y el inicio de la oscilación del sensor que recibe. Pero este tiempo no se corresponde exactamente con la realidad, y esta inestabilidad es una de las causas principales de la inestabilidad en caudales próximos al cero. Otro problema puede ser que

los dos sensores tengan propiedades térmicas diferentes, lo cual también puede afectar al tiempo de propagación.

Con todo esto, el grupo de investigadores desarrolló un medidor con un tercer sensor, de manera que los dos primeros sensores actúan ambos como transmisores, y el tercer es un receptor común, lo cual elimina la influencia de las diferencias entre sensores. El receptor común se sitúa entre los dos sensores transmisores, a igual distancia de ambos, y con este diseño consiguieron mejorar la estabilidad en el punto cero, llegando a medir caudales por debajo de 1 ml/min, en un tubo de 0.5 mm de diámetro interno, con una desviación estándar de 0.01 ml/min aproximadamente.

6.3. Sensor de flujo micro mecánico

En 2004, David A. Czaplewski, Bojan Rob Ilic y un grupo de investigadores [34] desarrollaron un medidor que consistía en un encapsulado dentro del cual había colocado un plato cuadrado de 100 μm de lado y 500 nm de espesor, y un sistema de desviación laser. El plato estaba hecho con una superficie de silicona y sujeto por 3 lados. Alrededor del plato y por el interior del encapsulado circula el fluido. Desde el exterior del encapsulado, el dispositivo emite un láser hacia el plato desde unos 45°, y el haz reflejado se recoge en un fotodiodo. Las pruebas se realizaron con varios fluidos y el ángulo del haz reflejado, medido en micro radianes (μrad), varía en función del caudal proporcionado. Los resultados obtenidos mostraban una relación lineal entre el ángulo del haz reflejado y el caudal, para un rango entre 2.1 y 41.7 $\mu\text{l/min}$, independiente del tipo de fluido y con una sensibilidad de $12.5 \pm 0.2 \mu\text{rad}/(\mu\text{l/min})$.

7. Estudio de mercado

Como ya se ha mencionado, el objetivo de este proyecto es el desarrollo o adquisición de un medidor de flujo para su implementación en sistemas de flujo SIA y FIA. En el caso concreto de este proyecto, las condiciones que definen el flujo a medir son las que se muestran en la **Tabla 7.1**.

Tabla 7.1 Características de flujo

Fluido	Fluidos en solución acuosa
Flujo	0.5-5 ml/min
Diámetro interior de los tubos	0.8 y 1 mm
Diámetro exterior de los tubos	1/16"
Material de las conexiones	PEEK, teflón
Temperatura de trabajo	Temperatura ambiente
Presiones de trabajo	Trabajo con bomba peristáltica Gilson minipuls 3. Presión máxima: 0.5 MPa
Densidad y viscosidad del fluido	Densidad y viscosidad del agua

En concreto, las condiciones de flujo y los diámetros internos de los tubos utilizados en laboratorio hacen que la medición de flujo sea complicada y que la oferta de medidores en el mercado sea reducida. No obstante, y con los conocimientos adquiridos tras el estudio teórico de medidores de flujo, se decide realizar un estudio de mercado.

El estudio de mercado se ha dividido en tres fases. En una primera fase se realiza una búsqueda online de los principales fabricantes y distribuidores de medidores o sensores de flujo, y se busca en sus respectivos catálogos la existencia o no de algún dispositivo válido para las condiciones dadas. La segunda fase consiste en descartar aquellos fabricantes y distribuidores que no ofrecen dispositivos válidos y seleccionar aquellos que si los ofrecen. En la tercera y última fase se mantiene contacto con los fabricantes y distribuidores para obtener información concreta de los dispositivos y conocer presupuestos.

En la **Tabla 7.2** se muestran los fabricantes consultados online mediante sus catálogos.

Tabla 7.2 Fabricantes de medidores consultados

Titan Enterprises Ltd.	Honeywell	SIMTECH Process Systems
KROHNE Group	Aalborg	OMEGA Engineering inc.
Vögtlin Instruments AG	ACS-CONTROL-SYSTEM	IFM Electronic S.L.
Emkometer	TECFLUID S.A.	Hans TURCK GmbH Co.
KOBOLD	ASV Stübbe	Thermal Instrument Co.
Blue-White Industries	VSE.flow	Bürkert Fluid Control Systems
Bronkhorst	Hoffer Flow Controls, INC.	Sierra Instruments, Inc.
KIMO Instruments	Brooks Instrument	Sensirion
ABB Group	Cole-Parmer	CDI meters

Gran parte de los fabricantes carecen de medidores válidos para caudales tan bajos. Esta primera fase de consulta permite descartar gran parte de ellos y obtener una breve lista con aquellos que si pueden ofrecer un producto válido. Dichos fabricantes son los siguientes:

- Sensirion
- ABB Group
- Cole-Parmer
- KOBOLD

Por otro lado, el estudio de mercado se ha extendido a través de los siguientes distribuidores:

- Álava ingenieros, empresa del Grupo Álava Ingenieros (Madrid).
- Arcamo Controls, S.A. (delegación de Tarragona).
- Fisher Scientific, parte de Thermo Fisher Scientific (Madrid).
- Instrumentación analítica, S.A. (Barcelona).

Desde Álava ingenieros e Instrumentación analítica, S.A. la oferta de medidores no cubriría las condiciones de flujo del proyecto. Fischer Scientific distribuye productos de la empresa Cole-Parmer, una de las seleccionadas tras la primera fase del estudio de mercado, y tras mantener contacto, Cole-Parmer no dispone tampoco de productos válidos.

En cambio, Arcamo Controls, S.A. si trabaja con empresas que disponen de caudalímetros aptos. En concreto, con ABB Group y con KOBOLD, de nuevo empresas ya seleccionadas en la primera fase del estudio.

Así pues, finalizadas las dos primeras fases de estudio, las empresas seleccionadas son las siguientes: ABB Group, KOBOLD y Sensirion.

7.1. Medidor de Sensirion

Sensirion es una empresa con sede en Suiza que comercializa sensores, proporcionando sensores de flujo, de humedad, de temperatura y de presión diferencial. Dentro de su gama de productos de medidores de flujo para líquidos (Liquid Flow Meters), hay un dispositivo que cumple con las condiciones de flujo del proyecto. Este modelo es el SLI-2000. Se trata de un medidor para la medición de flujos muy bajos de líquidos en base acuosa o hidrocarburos. Su principio de operación se basa en la tecnología del microsensor térmico. Como se ha explicado en los medidores térmicos, el sensor genera una cantidad de calor y dispone de un sensor de temperatura a cada lado del generador de calor. El flujo, al pasar, se calienta, y gracias a los sensores de temperatura, se puede medir la diferencia de temperatura antes y después de la aplicación del calor. Esta diferencia de temperatura permite obtener el caudal.

Se trata de un dispositivo con un tiempo de respuesta corto y de alta precisión, trabaja sin partes móviles y es un medidor no intrusivo. Tiene un rango de medición en agua de entre 0.5 y 5 ml/min, permite una operación bidireccional, las conexiones de tubos están disponibles en 1/32", 1/16" y 1/8", y puede trabajar a una presión máxima de 1.2 MPa.



Figura 7.1 Sensor de flujo para líquidos de Sensirion, modelo SLI-2000

7.2. Medidores de ABB

ABB es una empresa global líder en energía y tecnologías de automatización. Entre sus productos, ABB suministra rotámetros capaces de medir caudales bajos y a bajo precio. A través del distribuidor Arcamo Controls, S.A. se ha obtenido información respecto a los rotámetros de ABB. El modelo es el A6100 y hay 3 tipos. El primero de ellos tiene un rango de medición de entre 0.3 y 4.7 ml/min y un tubo de 1/16" de diámetro; el segundo tipo tiene un rango de medición de entre 0.4 y 5.4 ml/min y un tubo de 1/8" de diámetro; y el tercer tipo tiene un rango de medición de entre 0.6 y 4.4 ml/min y un tubo de 1/8" de diámetro. Todos los tipos tienen conexiones NTP de 1/4", escala de 5" y son de lectura directa. Para su control, cada tipo puede disponer de válvula de regulación a la entrada, y para la conexión de tubos hay conectores para reducir la entrada a 1/16".



Figura 7.2 Rotámetros ABB, series A6100 y A6200

7.3. Medidor KOBOLD

KOBOLD es una de las empresas líderes internacionales en instrumentación para monitorización, medida y regulación de propiedades físicas, presión, temperatura y flujo. Igual que los rotámetros de ABB, a través del distribuidor Arcamo Controls, S.A. se ha obtenido información respecto a los medidores de KOBOLD. El modelo para líquidos apto para las condiciones de flujo del proyecto es el KDF-9291 NV 0 00 0, y es un rotámetro. Se trata de un medidor con un rango de medición de entre 0.02 y 0.25 l/h (0.33 ml/min y 4.17 ml/min), con tubo de cristal de borosilicato y conexiones 1/4" NTP. Tiene una pérdida de presión de 2 mbar, válvula de regulación a la entrada y lectura directa sobre el cristal. Es de instalación vertical (flujo circulando de abajo a arriba).



Figura 7.3 Rotámetro KOBOLD, modelo KDF-9291

7.4. Comparativa y elección final

En la **Tabla 7.3** se muestra una comparativa entre los medidores preseleccionados.

Tabla 7.3 Comparativa entre los 3 fabricantes seleccionados

	Sensor de flujo Sensirion SLI-2000	Rótámetro ABB series A6100	Rotámetro KOBOLD modelo KDF-9291
Rango de flujo (ml/min)	0.5 a 5	0.3 a 4.7 0.4 a 5.4 0.6 a 4.4	0.33 a 4.17
Ø conexión		1/4" NTP	1/4" NTP
Ø interno	1.8 mm	1/8" o 1/16"	
Bidireccionalidad	Si	No	No
Posición de trabajo	Horizontal	Vertical	Vertical
Pérdida de presión	<1 mbar	-	2 mbar
Precisión (% de escala completa)	0.2	2.5 (Ø _{int} de 1/8") 6 (Ø _{int} de 1/16")	3.5
Lectura de flujo	Software informático	Directa (visual)	Directa (visual)
Tecnología	CMOSens (medidor térmico)	Medidor de área variable (rotámetro)	Medidor de área variable (rotámetro)
Precio aprox.(€)	990	165-290	330

Tras dicha selección y comparativa la selección final es el sensor de flujo Sensirion SLI-2000.

Los rotámetros de ABB y de KOBOLD fueron descartados por diferentes motivos. En primer lugar, la precisión de ambos es menor que la del medidor de Sensirion, en gran parte debido a que su lectura es directa sobre el tubo de cristal, mientras que el medidor SLI-2000 tiene una lectura mediante software. Además, la lectura mediante software permite la toma de datos en continuo, echo especialmente importante en la monitorización de procesos.

En cuanto al precio, los dos rotámetros eran mejor opción que el medidor de Sensirion. No obstante, los fabricantes de los rotámetros fabrican sus dispositivos a petición del cliente en el momento del pedido, y el tiempo de entrega de los rotámetros excedía el límite de tiempo del proyecto. Por otro lado, el medidor Sensirion tiene un tiempo de entrega de 10 días.

Tras todas estas consideraciones, la mejor elección posible y la que se ha acabado realizando es el sensor de flujo Sensirion SLI-2000.

8. Procedimiento experimental

El sensor de flujo Sensirion SLI-2000 adquirido será incluido en sistemas de flujo FIA y SIA para el conocer y controlar el caudal en diferentes puntos de estos sistemas. Antes de ser incorporado a dichos sistemas, se ha realizado un estudio de su comportamiento en cada uno de estos dos sistemas, para comparar sus resultados con los datos y características proporcionados por el fabricante.

8.1. Calibración bomba peristáltica

Como se ha visto en la **Sección 4.1**, en sistemas de flujo FIA se utilizan bombas peristálticas para bombear los fluidos haciendo que circulen por el sistema. Para estudiar el comportamiento del sensor en sistemas de flujo con bombas peristálticas, se ha realizado una calibración de una bomba peristáltica para después comparar los resultados de caudal proporcionados por la bomba a diferentes velocidades con los resultados de caudal obtenidos con el sensor.

8.1.1. Bomba persitáltica MINIPULS® 3

En este proyecto se ha utilizado una bomba peristáltica MINIPULS® 3 de Gilson, Inc. [35], y se puede ver en la **Figura 8.1**. Tiene una cabeza de 8 canales y da un caudal de 0.3 µl/min hasta 30 ml/min. En estos canales se coloca un tubo flexible de PVC rodeando el cuerpo central de cilindros. Para fijar el tubo, cada canal tiene dos ranuras por donde el tubo pasa y queda fijado por unos topes que tienen incorporado. Por la parte trasera, el tubo se aprieta, de manera que con el giro de los cilindros del cuerpo central se bombea líquido a través de los tubos.

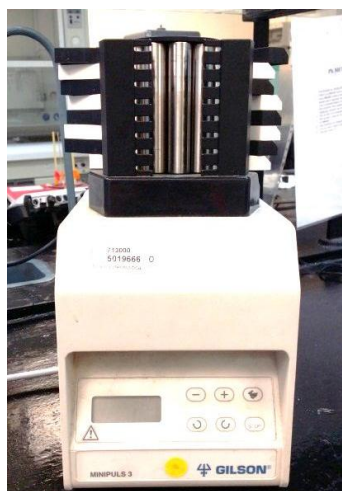


Figura 8.1 Bomba peristáltica MINIPULS 3 de 8 canales

Los tubos de bomba utilizados en este modelo de bomba peristáltica se clasifican mediante un código de colores. En el caso de este proyecto, se han utilizado tubos con codificación *azul-azul*, como se ve en la **Figura 8.2**. Se trata de tubos de PVC de 1.65 mm de diámetro interno. Son transparentes y claros, y son para uso general.

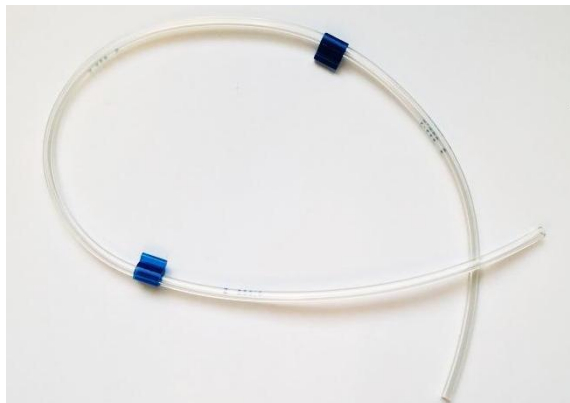


Figura 8.2 Tubos de bomba con codificación azul-azul

El caudal se controla mediante la velocidad de la bomba, la cual es ajustable desde 0 hasta 48 rpm, con incrementos de 0.01 rpm hasta 9.99 rpm y de 0.1 rpm a partir de 10 rpm. Cabe mencionar que el caudal también se ve influenciado por el apriete del tubo en el canal de uso.

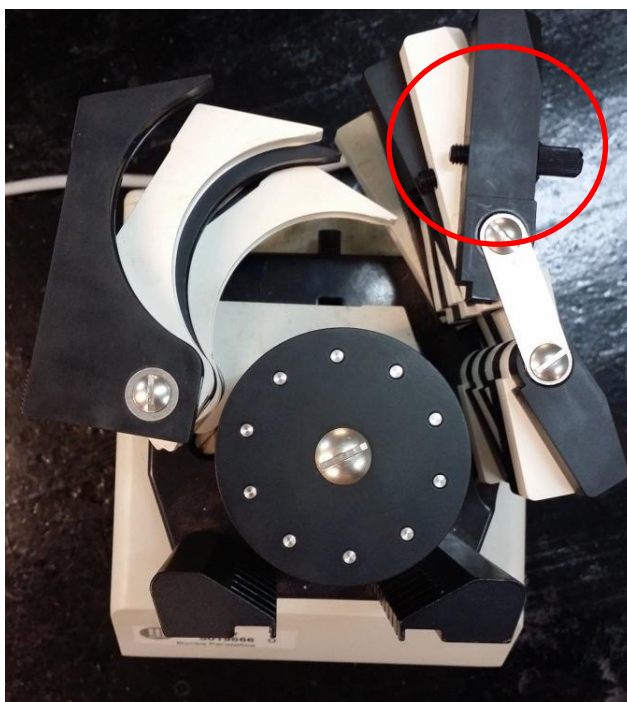


Figura 8.3 Vista superior de la cabeza de la bomba. En el círculo, tornillo de apriete del canal

8.1.2. Montaje experimental

Se ha realizado un simple montaje experimental para comprobar el caudal proporcionado por la bomba descrita anteriormente a diferentes velocidades. Para realizar la calibración, se ha tenido en cuenta el rango de medición del sensor Sensirion SLI-2000 debido a que posteriormente se compararán los resultados obtenidos con la bomba con los resultados obtenidos con el sensor. Así pues, se han calibrado velocidades de bomba que proporcionasen caudales de entre 0.5 ml/min y 5 ml/min.

El montaje consta de los siguientes elementos, y se puede ver en la **Figura 8.4**:

- Dos vasos de precipitados (el volumen de los vasos no es relevante).
- Dos tramos de tubo de diámetro interior de 0.8 mm.
- Un tubo de bomba, codificación *azul-azul*.
- Una bomba peristáltica.
- Una balanza (granatario).
- Un cronómetro.



Figura 8.4 Montaje experimental para calibración de la bomba

En el primer vaso de precipitados se coloca una cierta cantidad de volumen de agua. Este vaso sirve de alimentación de líquido. Se coloca un extremo de un tubo de 0.8 mm de diámetro interior dentro del vaso de precipitados, y por el otro extremo se une al tubo de bomba. Para hacer esta unión se introduce el tubo de 0.8 mm de diámetro interno en el tubo de bomba unos 2 o 3 centímetros. El tubo de bomba se coloca en un canal de la bomba (en

el caso de este proyecto, las pruebas se han realizado en el canal de más arriba del cabezal), y en la salida se conecta el segundo tubo de 0.8 mm de diámetro interior de la misma manera que el otro tubo. Este segundo tramo de tubo es la salida del sistema, y se introduce mediante un agujero en la parte superior de la tapa de la balanza al interior de la misma. Dentro de la balanza se encuentra el segundo vaso de precipitados, previamente tarado, y en el cual se depositará el líquido. Es importante mantener perfectamente cerrada la balanza, pues cualquier ráfaga de aire o movimiento puede afectar a la lectura.

Una vez se tiene preparado el sistema de medida, se procede a la calibración. El método utilizado ha sido por pesada: se acciona la bomba durante un tiempo determinado, medido con el cronómetro, y se pesa el líquido que ha fluido en este período de tiempo. Conociendo la densidad del líquido, ρ , se pasa la masa pesada, m , a volumen, V :

$$m = \rho \cdot V$$

Conocido el volumen y el tiempo, t , correspondiente se obtiene el caudal, Q :

$$Q = \frac{V}{t}$$

A continuación se detallan los aspectos que se han tenido en cuenta para la calibración:

- El líquido utilizado ha sido agua. Se ha considerado una densidad de 1 g/ml.
- El apriete del tubo de bomba se ha regulado al principio de la calibración hasta permitir el paso del fluido. Una vez fijado el apriete, no se ha modificado en ningún momento.
- Para cada velocidad de bomba calibrada se han realizado 3 medidas y se ha hecho la media.

8.2. Estudio de funcionamiento del sensor Sensirion SLI-2000 en sistemas de flujo FIA

Tras la adquisición del dispositivo, se procede a implementarlo en el laboratorio. Para ello, se comprobará su funcionamiento y se comparará con los valores obtenidos con la bomba, tal como se ha mencionado en la **Sección 8.1**. Antes, se estudiará su funcionamiento y su software de visualización.

El medidor de Sensirion se suministra en un kit de elementos, que incluye:

- El medidor de flujo, en el caso de este proyecto, el medidor SLI-2000.
- Un cable de conexión SCC1-USB desde el sensor al puerto USB.

- Un cable analógico SCC1-Analog.
- Un set de conectores.
- Un folleto de instrucciones para descargar el software de visualización.
- Un certificado de calibración del fabricante.

Para la conexión del dispositivo al ordenador es preciso primero instalar el software. Esta instalación puede realizarse mediante el USB Flash Drive incluido en el kit o descargando el software desde la página web de Sensirion. Instalado el software, ya se puede conectar el medidor mediante el cable SCC1-USB a un conector USB del ordenador.

Antes del uso del medidor se tiene que hacer la conexión al sistema de flujo. Para ello se usan los conectores del kit suministrados por el fabricante. Cabe tener en cuenta las dimensiones de los tubos que se conectan y el diámetro interior del medidor de flujo. En el caso de este proyecto, los tubos utilizados, como ya se mencionó en la **Sección 7**, son de 0.8 y 1 mm de diámetro interior, mientras que el medidor tiene un diámetro interior de 1.6 mm. El hecho de que el tubo a conectar tenga un diámetro más pequeño puede implicar la aparición de turbulencias y, por tanto, errores de lectura en el medidor. Tras el contacto con el fabricante, se aconseja colocar un tramo de tubo de unos 10 cm y de diámetro interior igual o mayor al del medidor entre el medidor y el tubo del sistema de flujo. Podría ser de interés en trabajos futuros poner tubos de 1/16" de diámetro exterior y comprobar la aparición y el efecto de las turbulencias.

Realizadas todas las conexiones ya puede empezar a utilizarse el medidor.

8.2.1. Software de visualización Sensirion

Al abrir el programa de visualización de datos de los sensores Sensirion, se abre la ventana *Product Selection*, como la que se ve en la **Figura 8.5**.

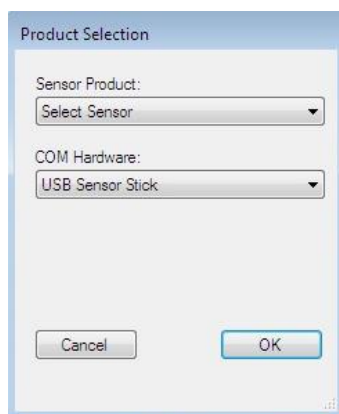


Figura 8.5 Ventana *Product Selection* del programa de visualización

En el desplegable *Sensor Product* se escoge el tipo de sensor con el que se trabaja. En este caso se trata de un *Liquid Flow Sensor*. En el siguiente desplegable, *COM Hardware*, se debe seleccionar *RS485 Sensor Cable*, correspondiente a la conexión del cable USB del dispositivo.

Una vez seleccionadas estas dos primeras opciones, la ventana se ensancha y el programa demanda otras opciones antes de entrar al propio programa. Esta nueva ventana se ve en la **Figura 8.6**.

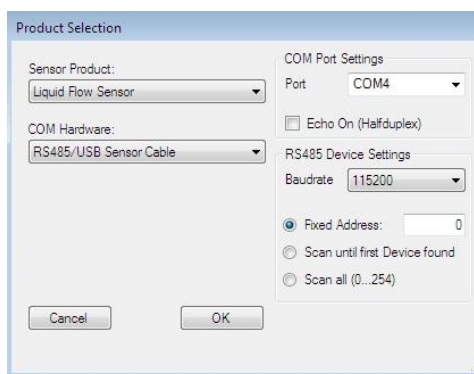


Figura 8.6 Ventana *Product Selection* tras las selecciones de *Sensor Product* y *COM Hardware*

Todas las nuevas opciones que aparecen en la ventana tienen un valor por defecto, y dicho valor es el recomendado por el fabricante para trabajar con medidores de flujo de líquidos.

Una vez determinadas todas las opciones, se hace click en OK y aparece la ventana principal del programa, como se ve en la **Figura 8.7**.

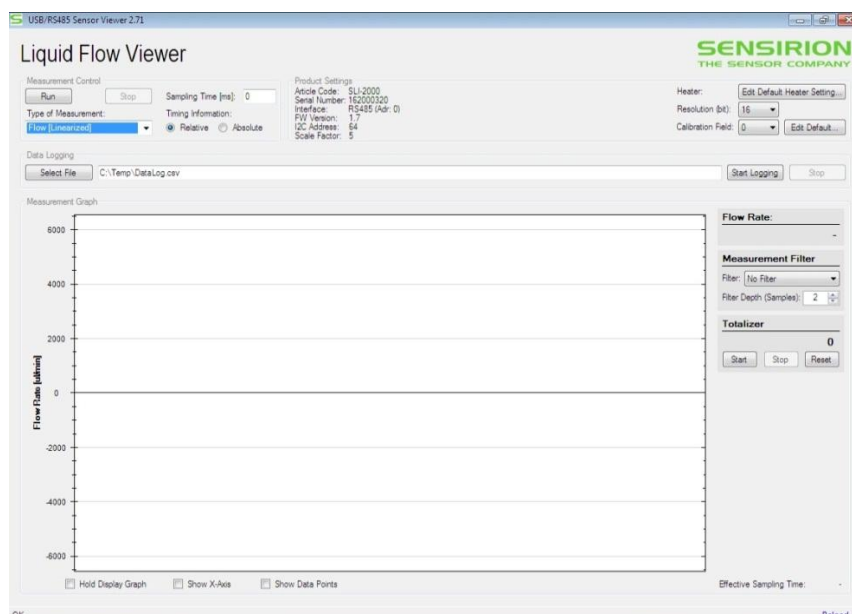


Figura 8.7 Ventana principal del programa de visualización del medidor Sensirion

Desde esta ventana principal se accede a todas las funciones del programa. A continuación

se explica cada una de las funciones:

Measurement control

- **Run:** para empezar la medición. Al accionar esta función el sensor empieza a leer y el programa empieza a graficar los valores que obtiene en color verde, como se observa en la **Figura 8.8**.



Figura 8.8 Gráfico de color verde de las mediciones tras accionar Run

- **Stop:** para parar la medición.
- **Type of Measurement:** hay 3 opciones a elegir:
 - **Flow [Linearized].** Es la opción más común y la que sale por defecto al iniciar el programa. El programa accede a un campo de calibración que tiene incorporado que le permite proporcionar una respuesta lineal a los cambios en el flujo.
 - **Flow [Raw Ticks].** Se utiliza en casos en los que se quiere obtener los datos “sucios” de la medición, sin ser afectados por la linealización.
 - **Temperature [Linearized °C].** Muestra la temperatura sobre el chip del sensor. Esta temperatura es una combinación entre la temperatura del fluido y la temperatura ambiente.
- **Sampling Time [ms]:** tiempo de muestreo. Determinada cada cuanto tiempo el sensor capta un dato de la medición para una resolución determinada. Como se verá más adelante, la resolución, expresada en bits, puede tener un valor de entre 9 y 16. Cada valor de resolución se refiere al tiempo que toma el sensor para promediar

(integrar) la señal que recibe. Por ejemplo, una resolución de 9 bits corresponde a un tiempo de promedio de 1 ms. Esto significa que el tiempo de muestreo debe de ser de al menos 1 ms, pues es lo que tarda el programa en dar un valor respuesta de la señal que recibe. Si el tiempo de muestreo es superior al tiempo de promediado, por ejemplo 10 ms, el programa cogerá un dato durante el tiempo de promediado (en el ejemplo, en el primer ms) y el resto del tiempo (los 9 ms posteriores) espera hasta coger el siguiente valor.

Por defecto, el valor del tiempo de muestreo es 0. De esta manera, el programa selecciona automáticamente el tiempo de muestreo más rápido para una resolución dada. En el caso de toma de datos en un período largo, se recomienda introducir un tiempo de muestreo elevado para reducir la cantidad de datos.

- *Timing Information*: por defecto, está seleccionada la opción *Relative*. Esta opción significa que, en el caso de toma de datos, el primer dato corresponderá a tiempo 0 y los siguientes irán incrementando según el tiempo de muestreo. En el caso de seleccionar la opción *Absolute*, cada valor se corresponderá con el tiempo de medición actual en cada momento, expresado en [hh:mm:ss:ms].

Product Settings

- *Article Code*: muestra el modelo del sensor.
- *Serial Number*: muestra el número de serie del dispositivo, único para cada medidor.
- *Interface*: muestra la conexión utilizada (RS485).
- *FW Version*: muestra la versión de firmware actual del cable RS485.
- *I2C Address*: muestra la dirección I2C del medidor.
- *Scale Factor*: muestra el factor de escala. El factor de escala es un número usado por el programa para pasar los datos linealizados a unidades de flujo (como $\mu\text{l/min}$).

Todos estos valores no son modificables por el usuario.

- *Heater*: permite modificar la configuración del calentador. No es necesario modificar este valor en el uso de sensores de flujo de líquidos, como es el caso del SLI-2000. Al seleccionar la opción *Edit Default Heater Setting*, aparece la ventana que se ve en la **Figura 8.9**.

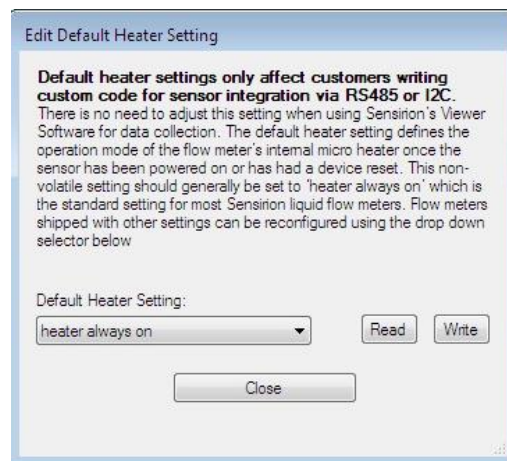


Figura 8.9 Aviso tras seleccionar Edit Default Heater Setting

- *Resolution (bit)*: resolución. Hace referencia al tiempo que necesita el sensor para hacer un promedio de la señal que recibe. Si el tiempo de promediado es grande, se obtiene un número mayor de datos significativos. El botón *Resolution* abre un desplegable que permite elegir desde 9 hasta 16. A continuación se muestra la correspondencia de cada número con el tiempo de promediado:
 - 9 bit: 1 ms
 - 10 bit: 2 ms
 - 11 bit: 3 ms
 - 12 bit: 6ms
 - 13 bit: 10 ms
 - 14 bit: 20 ms
 - 15 bit: 40 ms
 - 16 bit: 80 ms

Como se ha mencionado anteriormente, este valor va especialmente ligado al tiempo de muestreo. Si se tiene un tiempo de muestreo corto, una resolución baja es suficiente. Si se tiene un tiempo de muestreo largo, es recomendable usar resoluciones elevadas. No obstante, para encontrar el mejor valor de resolución es probar diferentes ajustes.

A continuación se puede observar un ejemplo del efecto de variar la resolución. Con la bomba fija a 25 rpm de velocidad, en la **Figura 8.10** se puede observar un gráfico con resolución de 9 bit, mientras que en la **Figura 8.11** se observa otro gráfico con resolución de 16 bits (en ambos casos, *Sampling Time* de 0 ms). Se puede ver claramente como con la resolución más baja, se obtiene un gráfico más amplio, con muchas oscilaciones que da lugar a valores poco precisos y con mucha variabilidad.

En cambio, con la resolución más elevada, el gráfico es mucho más fino y la toma de datos es más precisa, sin oscilaciones y con muy poca variabilidad.

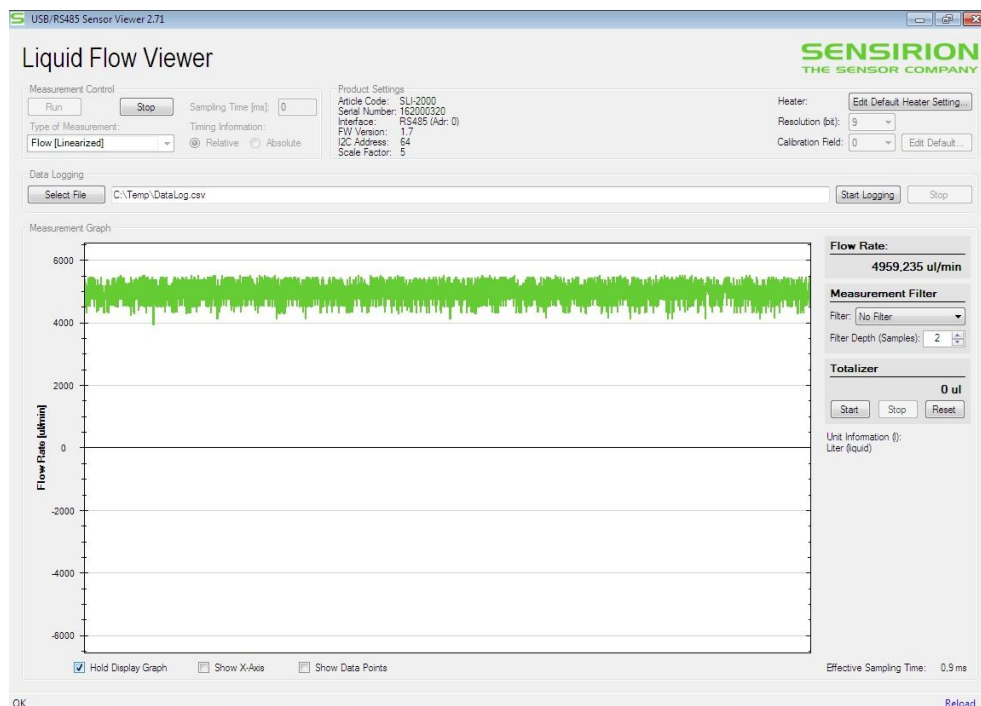


Figura 8.10 Gráfico obtenido con velocidad de bomba 25 rpm, Sampling Time de 0 ms y resolución de 9 bit

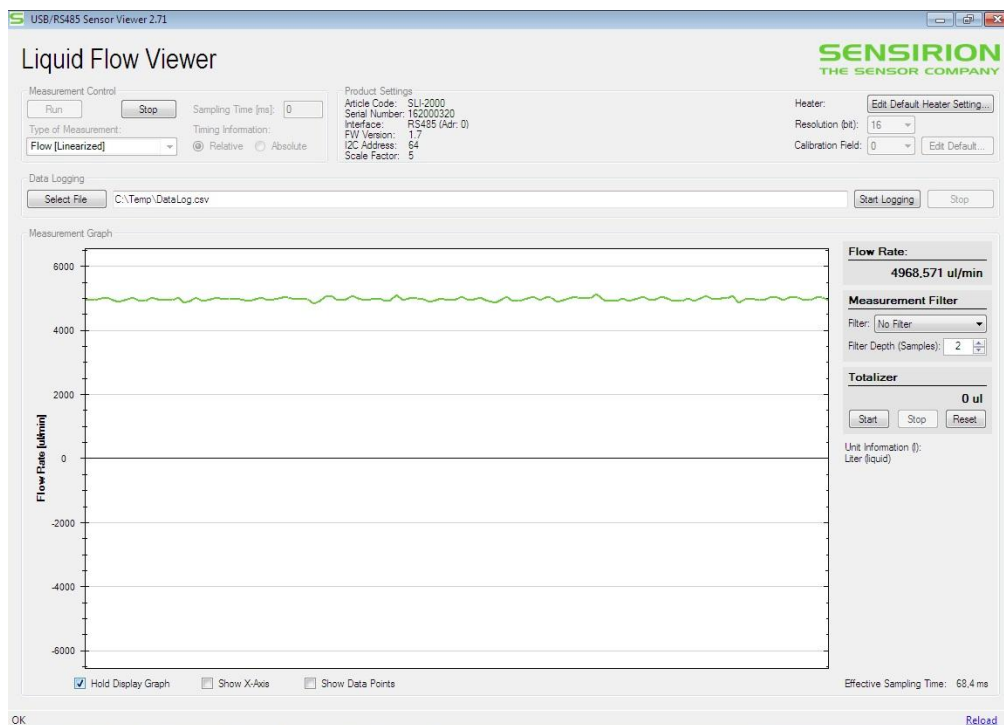


Figura 8.11 Gráfico obtenido con velocidad de bomba 25 rpm, Sampling Time de 0 ms y resolución de 16 bit

- *Calibration Field*: permite cambiar el campo de calibración. En el caso del sensor SLI-2000, por defecto tiene seleccionada el campo de calibración 0, que corresponde con la calibración para agua. El único campo de calibración seleccionable con el medidor SLI-2000 además del 0 es el 1, que corresponde a IPA. El resto de campos de calibración no son válidos para este sensor, y al seleccionarlos el programa nos da un aviso, como se en la **Figura 8.12**.

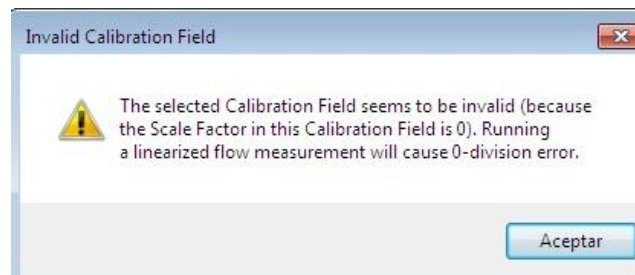


Figura 8.12 Aviso por uso de campo de calibración inválido

Data Logging:

- *Select File*: para seleccionar el archivo en el que se graban los datos. Por defecto, el programa crea un archivo llamado *DataLog.csv* en la carpeta temporal del ordenador. Este tipo de archivo guarda los datos de flujo medidos, y puede ser abierto con Microsoft Excel.
- *Start Logging*: para empezar a grabar datos en el archivo seleccionado. Para ello, debemos antes empezar a medir presionando el botón *Run*. Mientras se están grabando datos, el botón *Start Logging* pasa a ser el botón *Pause*. Este botón permite pausar la toma de datos y retomarla en el momento deseado, grabándose en el mismo archivo y a continuación de los últimos datos tomados.
- *Stop*: para parar la toma de datos. Si se quieren volver a grabar datos, se debe seleccionar un archivo diferente mediante el botón *Select File* o sobrescribir en el mismo archivo.

Measurement Graph

- *Flow Rate*: indica el flujo a tiempo real, actualizándolo cada 500 ms.
- *Measurement Filter*: para añadir un filtro de visualización al gráfico. Por defecto, el programa no muestra ningún filtro (*Filter: No Filter*). Presionando sobre el desplegable, se permite añadir el filtro *Average*. Seleccionando esta opción aparece en el gráfico una línea de color azul correspondiente al valor medio de un número de datos determinado. Este número de datos se determina mediante la opción *Filter Depth (Samples)*. En la **Figura 8.13**, un ejemplo de un gráfico con el promedio activado).

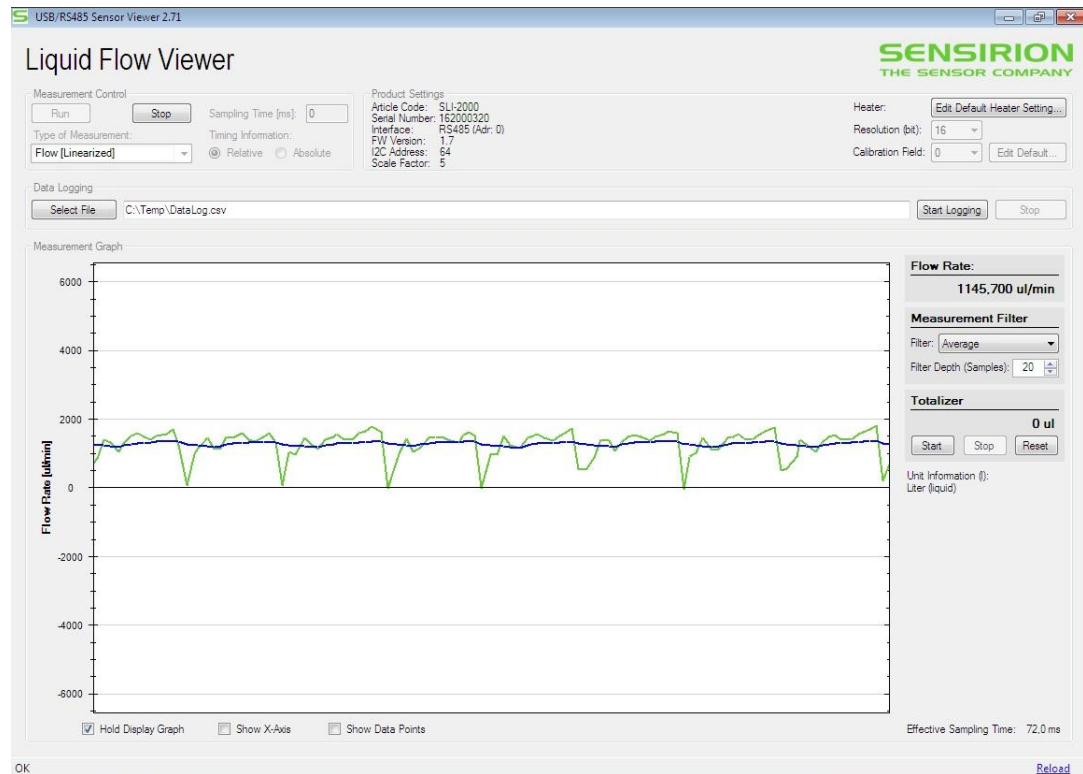


Figura 8.13 Gráfico de color azul que indica el valor medio de las medidas. En la figura, como ejemplo, número de datos para hacer promedio (Depth): 20 (Samples)

- **Totalizer:** permite conocer el volumen total de líquido que circula por el sensor. Mediante el botón *Start* se empieza a medir el volumen. Con el botón *Stop* se para la medición. Para reestablecer el volumen a 0, se utiliza el botón *Reset*.
- **Hold Display Graph:** permite bloquear la ventana del gráfico en el momento deseado.
- **Show X-Axis:** permite mostrar el eje X del gráfico, que corresponde al tiempo. El valor del tiempo depende del ajuste determinado en *Timing Information*. Si se ajusta en modo *Relative*, el primer valor de la medición será zero. Si se ajusta en modo *Absolute*, el eje muestra el tiempo real en el formato [hh:mm:ss:ms].
- **Show Data Points:** permite mostrar los puntos de los datos en el gráfico.
- **Effective Sampling Time:** muestra el tiempo de muestreo actual usado por el programa.
- **Reload:** para reiniciar el programa.

8.2.2. Montaje experimental sin supresor de pulsos

En la **Figura 8.14** se puede ver el primer montaje propuesto para comparar el valor de caudal dado por el sensor con el proporcionado por la bomba peristáltica según el cálculo y el

montaje mencionados en la **Sección 8.1**. Este montaje consta de los siguientes elementos:

- Dos tramos de tubo de 0.8 mm de diámetro interior.
- Tres tubos de bomba codificación *azul-azul*.
- Dos vasos de precipitados (el volumen no es relevante).
- Una bomba peristáltica.
- Una balanza.
- Sensor SLI-2000.

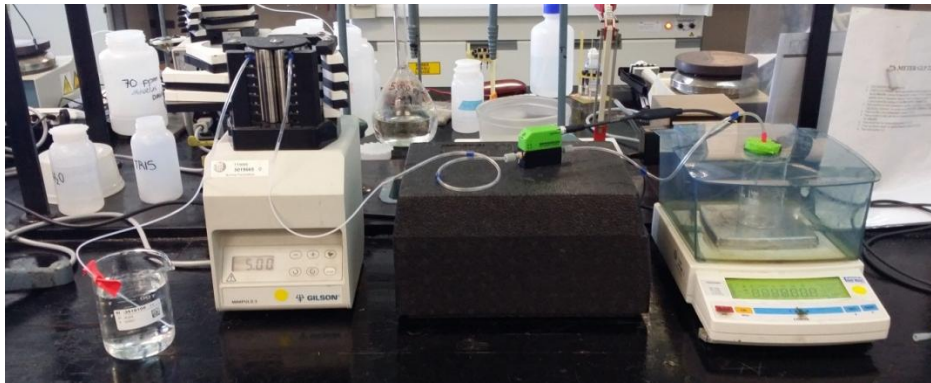


Figura 8.14 *Montaje experimental sin supresor de pulsos*

La base del montaje es la misma que ya se ha explicado en la **Sección 8.1.2**, con la única diferencia de la inclusión del sensor SLI-2000. En un primer vaso de precipitados se añade una cantidad de agua. Se introduce un extremo de un tubo de 0.8 mm de diámetro interior, que por el otro extremo se conecta a un tubo de bomba. Por tal de tener condiciones lo más parecidas posibles que en el montaje para la calibración de la bomba, el tubo de bomba se conecta en el mismo canal, y el apriete no ha sido modificado. En la salida del tubo de bomba se conecta el segundo tramo de tubo de 0.8 mm de diámetro interior. En este caso, este tramo no es la salida del sistema, sino que sirve para tener una longitud de tubo suficiente para conectar la bomba peristáltica y el medidor SLI-2000. Por el extremo del tubo se conecta un segundo tubo de bomba que a su vez se conecta al sensor por el otro extremo. La salida del sensor se conecta a un tercer tubo de bomba, cuya salida se introduce en la balanza donde se encuentra el segundo vaso de precipitados para recoger el líquido. Cabe mencionar que el uso de tubos de bomba a la entrada y la salida del sensor es debido a que son los únicos tubos de que se disponía a los cuales se podían acoplar los conectores suministrados por el fabricante.

8.2.3. Montaje experimental con supresor de pulsos

Tras observar los resultados obtenidos anteriormente se decide incorporar un supresor de pulsos para obtener una respuesta más estable del sensor. El montaje, que se ve en la **Figura 8.15** es el mismo que el anterior con la diferencia de la inclusión del supresor de pulsos. Para ello, los elementos añadidos son los siguientes:

- Un tramo de tubo de 0.8 mm de diámetro (además de los dos tramos ya presentes en el montaje).
- El supresor de pulsos.
- Dos conectores de 1/16" para conectar los tubos de 0.8 mm de diámetro a la entrada y salida del supresor de pulsos.

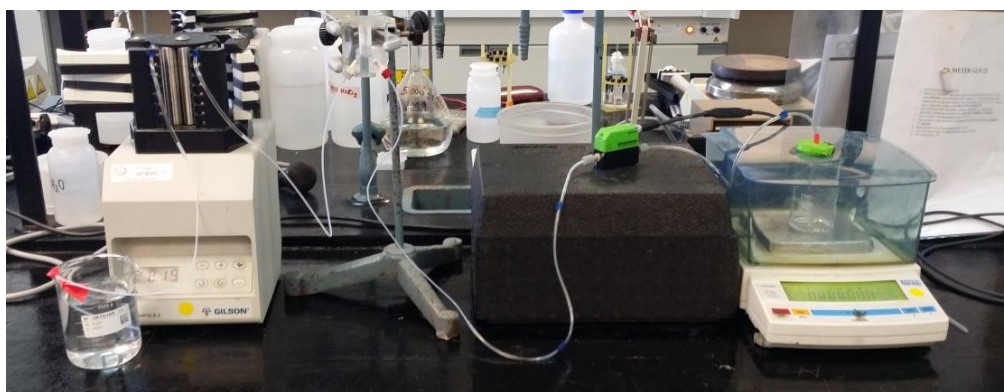


Figura 8.15 Montaje experimental con supresor de pulsos

El supresor de pulsos, que se ve en la **Figura 8.16**, es un elemento que, como su propio nombre indica, permite suprimir los pulsos presentes en el flujo (en este caso, producidos por la bomba). Consta de una entrada, una salida y un espacio interior cilíndrico. Para su uso, se introduce una pequeña cantidad de agua en el espacio interior y se le da la vuelta. Se conectan la entrada y la salida y ya se puede utilizar. Cuando el fluido pasa por el supresor, la columna de agua absorbe los pulsos del flujo.

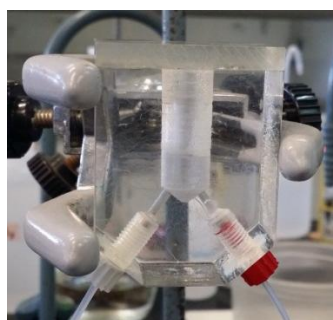


Figura 8.16 Supresor de pulsos

8.3. Estudio de funcionamiento del sensor Sensirion SLI-2000 en sistemas de flujo SIA

Tras el estudio del funcionamiento del sensor en un sistema de flujo FIA, el próximo paso que interesa dar es la inclusión del sensor en un sistema de flujo SIA. En la **Figura 8.17** se muestra un esquema del sistema SIA utilizado. Este sistema fue desarrollado en un proyecto anterior [36].

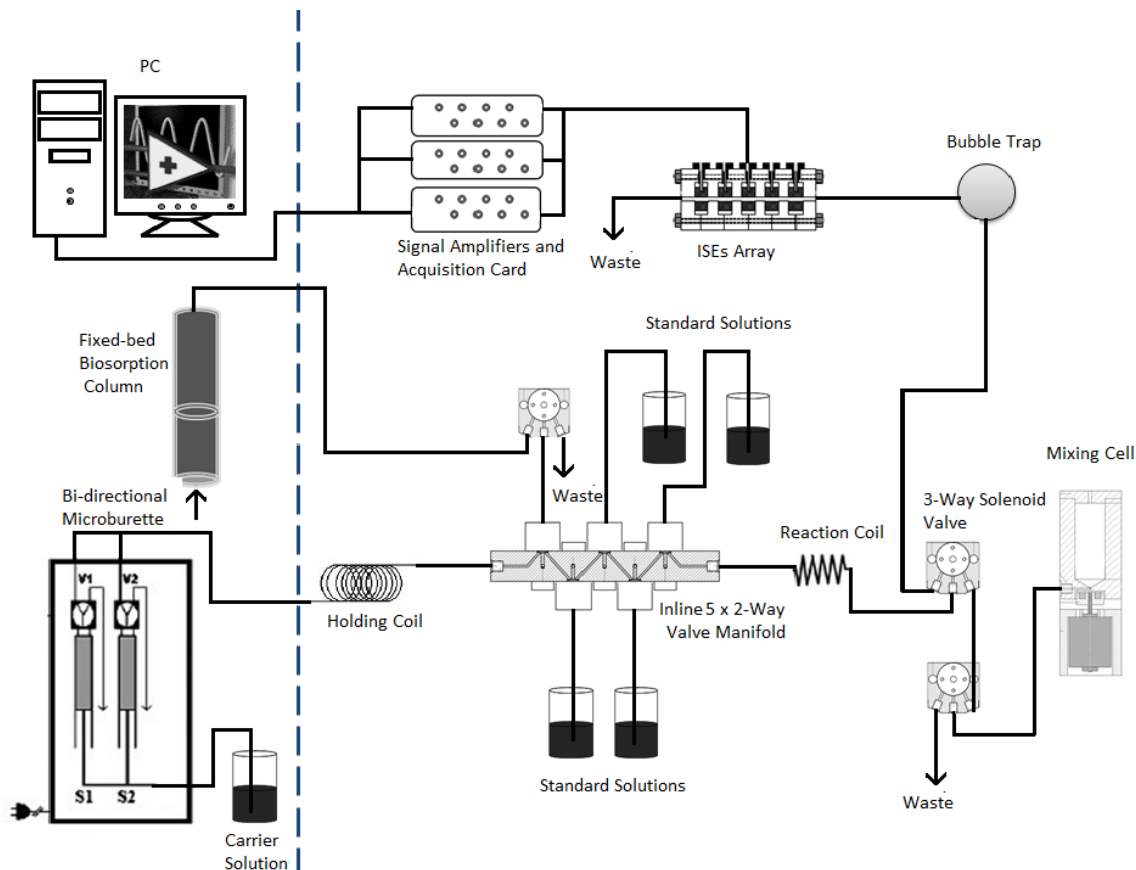


Figura 8.17 Esquema general del sistema SIA utilizado [36]

Los dos elementos principales del sistema son la bureta dispensadora, como se ve en la **Figura 8.18**, y el prototipo compuesto por el resto de elementos del sistema de flujo desarrollado en un proyecto anterior [36], como se ve en la **Figura 8.19**.

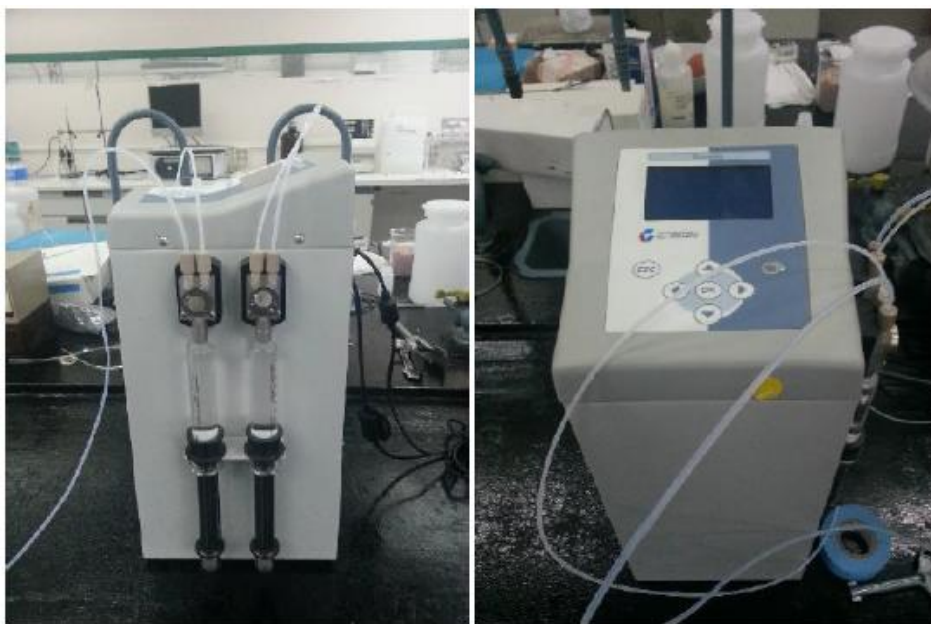


Figura 8.18 Bureta dispensadora. A la izquierda, jeringas conectadas. A la derecha, pantalla de control.

La bureta dispensadora consta de dos jeringas, una de 5 ml y otra de 10 ml. Para este montaje experimental, se ha utilizado la jeringa de 5 ml. El procedimiento experimental es el siguiente: se tiene un recipiente lleno de agua en el que se introduce un extremo del tubo de alimentación de la jeringa. Mediante el control informático del sistema de flujo, se acciona la jeringa, que aspira agua hasta llenarse completamente. Posteriormente, este volumen es dispensado al sistema al accionarse la jeringa mediante el programa informático de control. Cabe decir que el caudal al cual se dispensa el líquido se puede variar mediante el programa informático de control. Así pues, se probarán varios caudales ya conocidos para poder comparar con los valores de caudal que proporcione el sensor SLI-2000. Finalmente se conecta la salida del sistema, correspondiente a la salida del desburbujeador (ver **Figura 8.20**), al sensor de flujo mediante un tubo de 0.8 mm de diámetro interior y un tubo de bomba y sus respectivos conectores a la salida del sistema y a la entrada del sensor. A la salida del sensor se conecta otro tubo de bomba, y el líquido que sale se recoge en un vaso de precipitados.



Figura 8.19 Armario del sistema de flujo SIA utilizado



Figura 8.20 Desburbueador. El conector rojo (derecha) se corresponde con la salida del desburbueador

9. Resultados

9.1. Calibración bomba peristáltica

La calibración de la bomba se ha realizado por pesada. Los resultados obtenidos se pueden ver en la **Figura 9.1**.

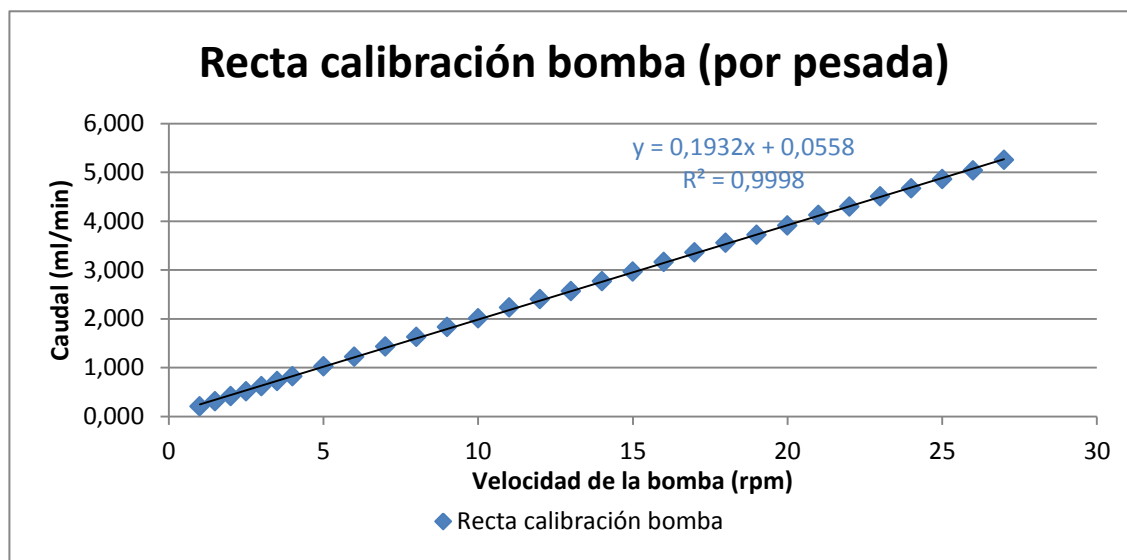


Figura 9.1 Recta de calibración de la bomba peristáltica

Tras probar varias velocidades de bomba, se decide empezar la calibración a velocidades de bomba de 1 rpm, cuyo caudal correspondiente es inferior a 0.5 ml/min, y continuar las pruebas hasta 27 rpm, cuyo caudal correspondiente es superior a 5 ml/min. De esta manera, conseguimos cubrir todo el rango de caudal de medición del sensor SLI-2000.

Como se observa en la **Figura 9.1**, el caudal proporcionado por la bomba respecto a la velocidad de ésta se ajusta a una recta.

Los valores obtenidos permitirán comparar los resultados obtenidos con el sensor SLI-2000, así como seleccionar la velocidad de bomba adecuada para obtener un caudal determinado.

9.2. Estudio de funcionamiento del sensor Sensirion SLI-2000 en sistemas de flujo FIA

9.2.1. Montaje experimental sin supresor de pulsos

Se han experimentado las mismas velocidades de bomba que para la calibración de la

bomba. Los ajustes del programa de visualización utilizados son los siguientes:

- *Resolution*: 9 bit.
- *Sampling Time*: 0 ms (es decir, el más rápido para la resolución dada).
- *Calibration Field*: 0.
- *Type of Measurement*: Flow [Linearized].
- *Timing Information*: Relative.

Los resultados se muestran en el gráfico de la **Figura 9.2**.

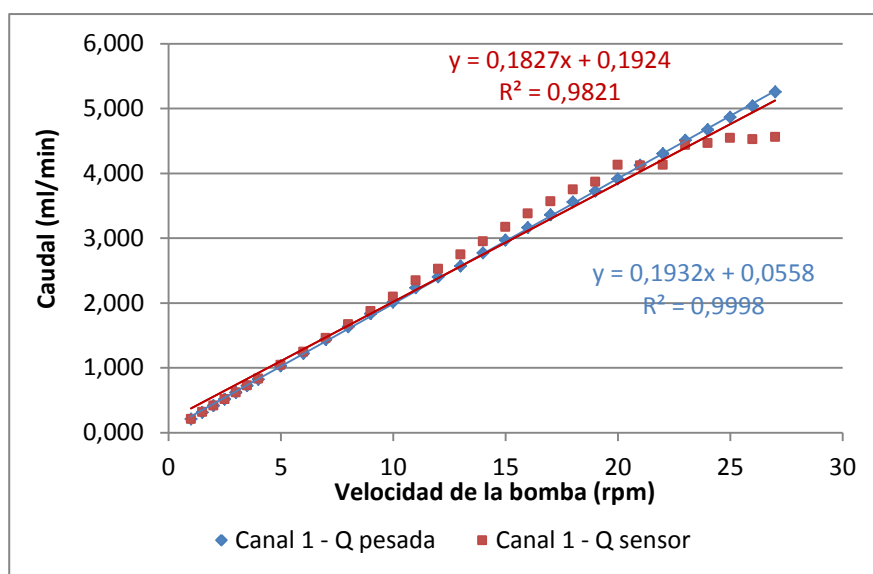


Figura 9.2 Caudal vs. velocidad de la bomba: resultados obtenidos por pesada y obtenidos con el sensor

La recta azul corresponde a los valores obtenidos por pesada en el procedimiento experimental de calibración de la bomba, mientras que la recta roja corresponde a los valores obtenidos con el sensor a las mismas velocidades de bomba.

Tal como se ve en la **Figura 9.2**, para velocidades bajas (de 1 a 10 rpm) el caudal medido por el sensor tiene un error prácticamente nulo (máximo 2%) respecto al caudal obtenido por pesada. A partir de 10 rpm y hasta 20 rpm, el error aumenta hasta un 7% aproximadamente. Finalmente, de 21 rpm hasta 27 rpm, el error aumenta considerablemente (hasta un 13%).

Si se obvian los puntos finales (a partir de 21 rpm), como se ve en la **Figura 9.3**, los resultados del sensor se ajustan mejor a una recta y el error con respecto al caudal obtenido por pesada es menor.

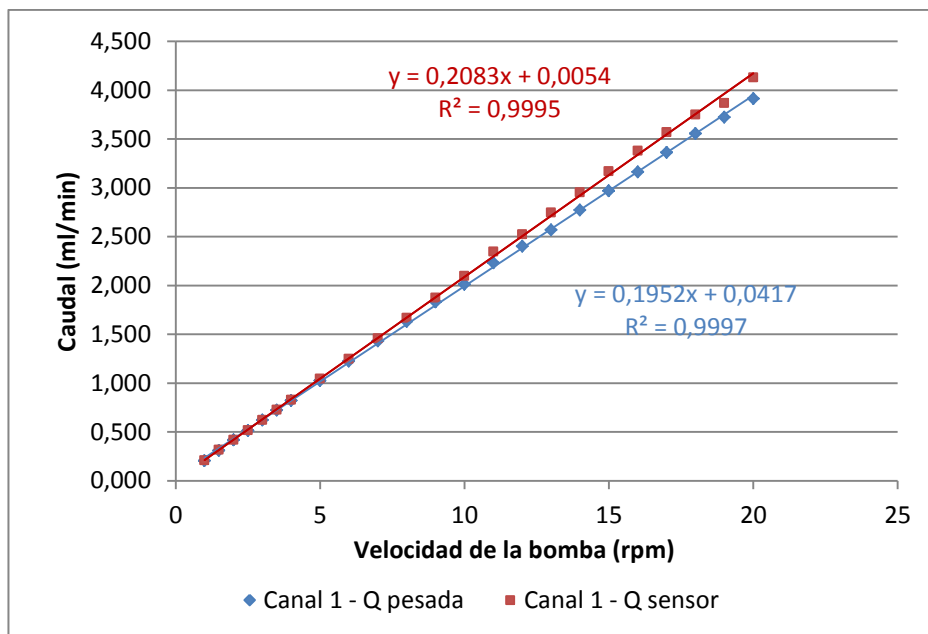


Figura 9.3 Caudal vs. velocidad de la bomba obviando los valores a partir de 21 rpm

En la **Figura 9.4** se observa el caudal del sensor respecto al caudal por pesada. En una situación ideal, los datos deberían ajustarse a una recta de pendiente 1, lo cual significaría que los valores obtenidos por el sensor se corresponden sin error a los obtenidos por pesada. Como se ve en la figura, la equivalencia no es perfecta, pero los valores tienen un ajuste razonable.

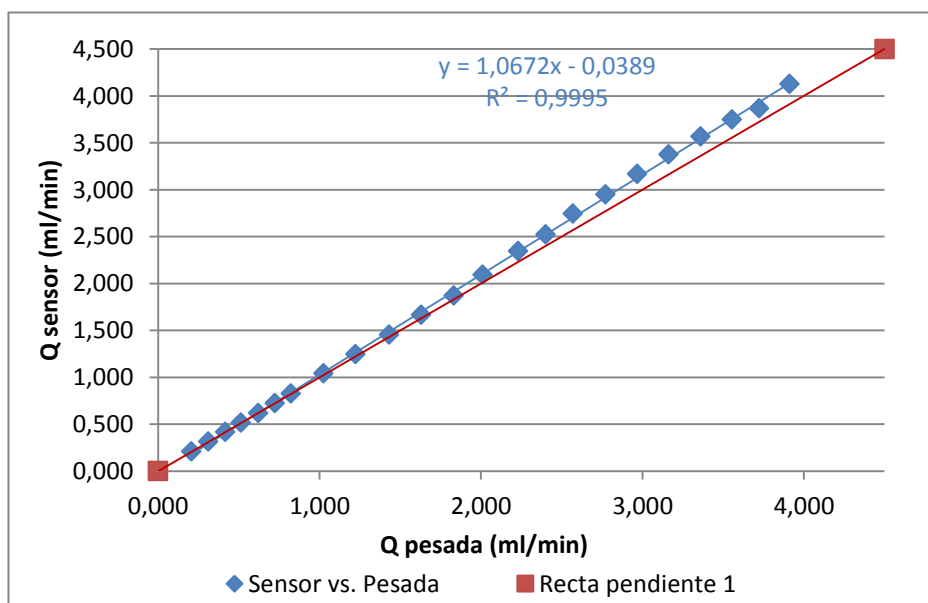


Figura 9.4 Caudal del sensor vs. caudal por pesada

No obstante, el echo de eliminar los valores correspondientes a velocidades de bomba superiores a 20 rpm elimina el rango de caudal de entre 4 ml/min y 5 ml/min. Esto significa

que el sensor no se ajusta al caudal especificado por el fabricante, pues no tiene una correcta representación hasta 5 ml/min.

Tras observar los resultados se busca el origen de este problema. Para ello, se utilizan los gráficos obtenidos con el programa de visualización de Sensirion. Como se ve en la **Figura 9.5**, donde se muestra el caudal a una velocidad de bomba de 1 rpm, a velocidades bajas se detectan unas oscilaciones muy pequeñas y poco frecuentes en el gráfico de caudal.



Figura 9.5 Gráfico de Sensirion, a velocidad de bomba 1 rpm

Estas pequeñas oscilaciones parecen no tener efecto en el caudal. No obstante, al aumentar la velocidad de la bomba se observa como el período y el tamaño de las oscilaciones aumenta, como se ve en la **Figura 9.6** donde se muestra el gráfico correspondiente a 15 rpm.



Figura 9.6 Gráfico de Sensirion, a velocidad de bomba 15 rpm.

Finalmente, se detecta que estas oscilaciones en el gráfico se deben a los pulsos producidos por el funcionamiento de la bomba. Este comportamiento es el que provoca que la precisión del sensor para medir caudales a partir de 4 ml/min sea tan baja. Como se ve en la **Figura 9.7**, los puntos elevados de las oscilaciones superan el valor máximo detectable por el sensor (5.5 ml/min), lo que significa que los puntos elevados quedan cortados por el valor máximo.

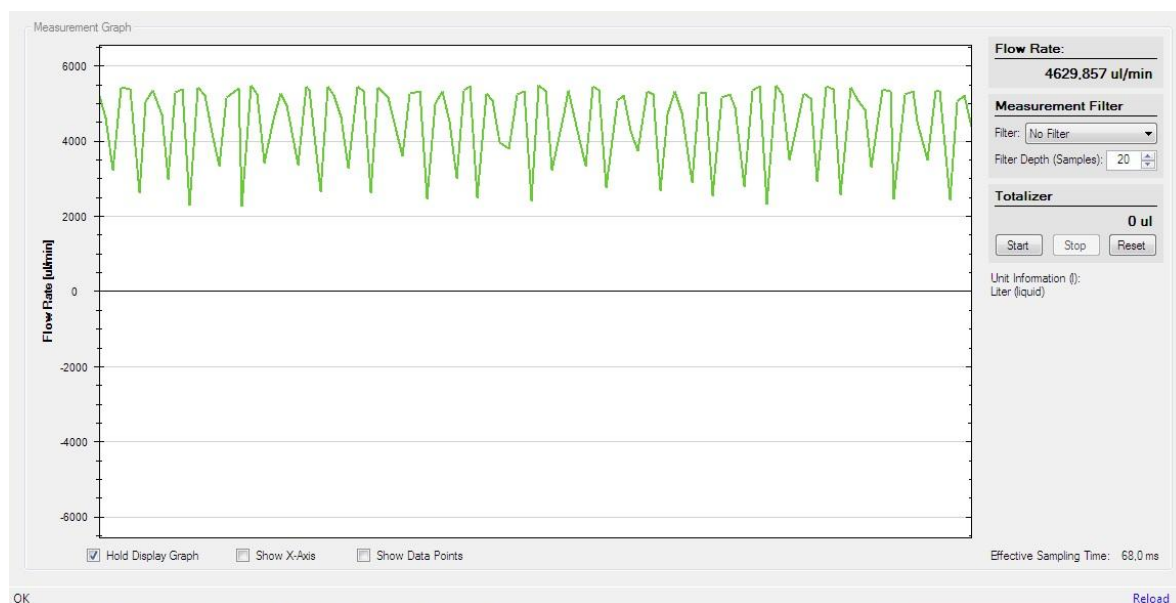


Figura 9.7 Gráfico de Sensirion, a velocidad de bomba 25 rpm

9.2.2. Montaje experimental con supresor de pulsos

Tras detectar los problemas en la detección de datos en el primer montaje se decide incorporar un supresor de pulsos entre la bomba y el medidor. Los ajustes del programa de visualización utilizados son los siguientes:

- *Resolution*: 9 bit.
- *Sampling Time*: 0 ms (es decir, el más rápido para la resolución dada).
- *Calibration Field*: 0.
- *Type of Measurement*: Flow [Linearized].
- *Timing Information*: Relative.

Los resultados se pueden observar en la **Figura 9.8**.

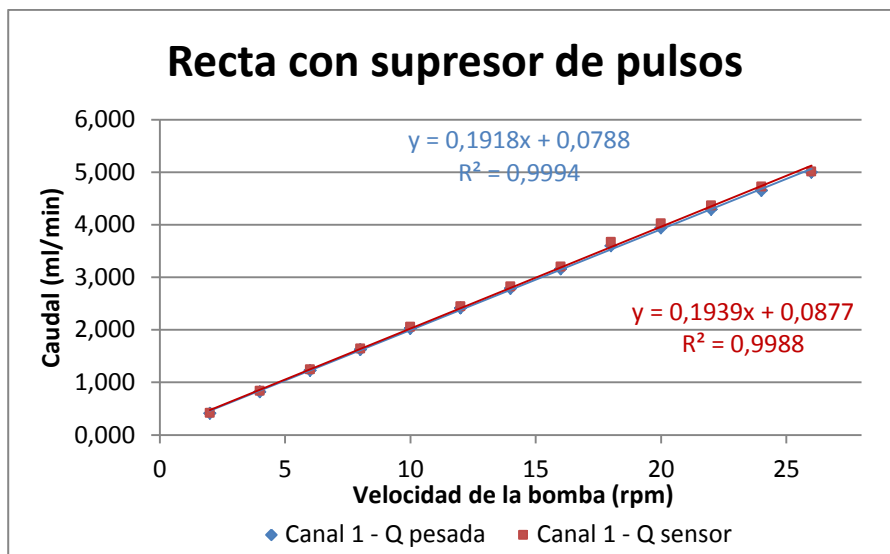


Figura 9.8 Caudal obtenido en función de la velocidad de la bomba: en azul, caudal obtenido por pesada; en rojo, caudal obtenido con el sensor

Como se observa en la **Figura 9.9**, los valores de caudal obtenidos con el sensor tienen un error respecto al caudal obtenido por pesada prácticamente nulo en todas las velocidades, incluso en el tramo entre 4 ml/min y 5 ml/min. Los errores a caudales elevados encontrados en el montaje experimental sin el supresor de pulsos han sido eliminados, y la recta de caudal en función de la velocidad de la bomba se ha mejorado. En la **Figura 9.9** se muestra el caudal obtenido con el sensor en función del caudal por pesada. Se puede observar como la recta tiene prácticamente una pendiente igual a 1 y que, por tanto, el valor obtenido con el sensor se corresponde con el valor obtenido por pesada.

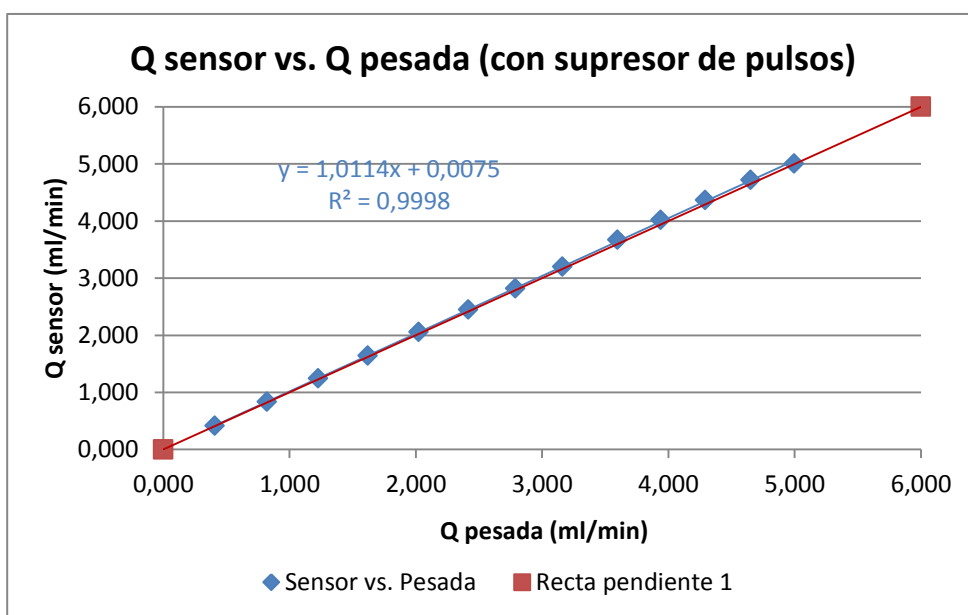


Figura 9.9 Caudal obtenido con el sensor en función del caudal obtenido por pesada

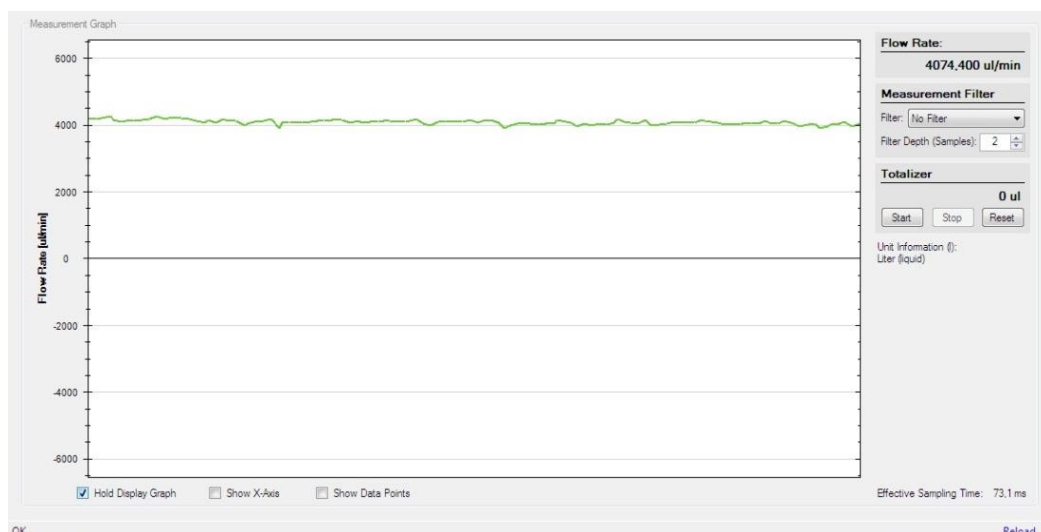


Figura 9.10 Gráfico de Sensirion, a velocidad de bomba 20 rpm

En la **Figura 9.10** se observa el gráfico de caudal del sensor a velocidad elevada (20 rpm). En el gráfico puede observarse como ya no aparecen las oscilaciones presentes en el primer montaje experimental, lo cual certifica el efecto positivo del supresor de pulsos y proporciona mayor precisión a la lectura del sensor.

9.3. Estudio de funcionamiento del sensor Sensirion SLI-2000 en sistemas de flujo SIA

Para comprobar el correcto funcionamiento del sensor al incorporarlo en un sistema de flujo SIA se ha experimentado con valores de caudales conocidos previamente y se han comparado estos valores con los obtenidos con el sensor. En la **Tabla 9.1** se muestran los caudales conocidos que se han probado y sus correspondientes resultados obtenidos mediante el uso del sensor, así como el error de cada medida respecto al valor teórico.

Tabla 9.1 Valores de caudal obtenidos con el sensor y errores respecto al caudal teórico conocido

Valor teórico (ml/min)	Valor medido (ml/min)	Error (%)
0.449	0.453	0.89
0.750	0.755	0.67
1.200	1.208	0.67
2.400	2.399	0.04
3.000	3.015	0.50
4.688	4.686	0.03

Como se puede ver en la **Tabla 9.1**, el error máximo que ha presentado el dispositivo frente al caudal ya conocido es de 0.67%, un valor lo suficientemente bajo como para afirmar que el dispositivo funciona correctamente. Se puede observar también en la **Figura 9.11**, como se obtiene una linealidad prácticamente perfecta entre el caudal medido con el sensor y el caudal teórico.

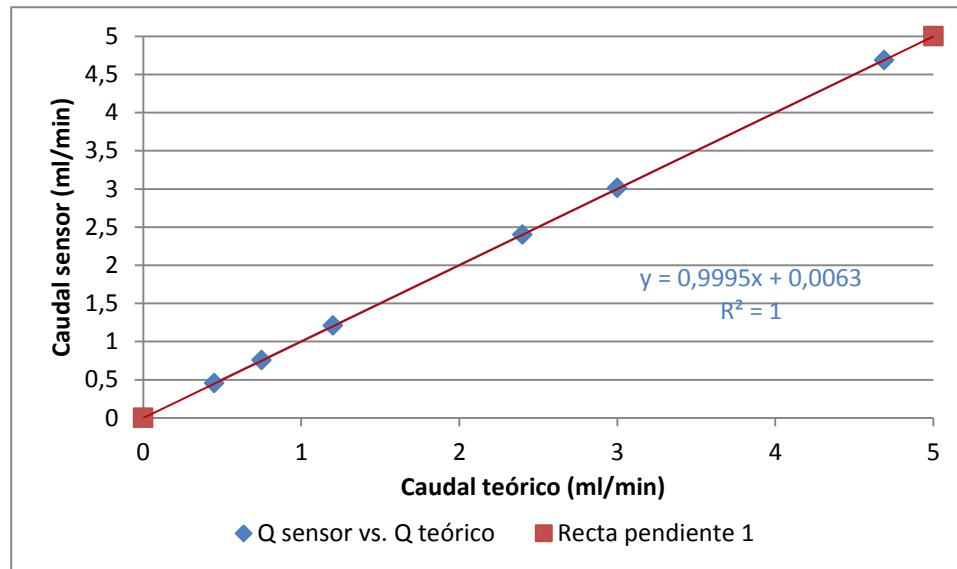


Figura 9.11 Caudal obtenido con el sensor en función del caudal teórico.

Los ajustes del programa de visualización utilizados son los siguientes:

- *Resolution*: 9 bit.
- *Sampling Time*: 0 ms (es decir, el más rápido para la resolución dada).
- *Calibration Field*: 0.
- *Type of Measurement*: Flow [Linearized].
- *Timing Information*: Relative.

10. Conclusiones

Tras el estudio del comportamiento del sensor Sensirion SLI-2000 se pueden obtener las siguientes conclusiones.

- En la implementación en sistemas de flujo FIA con bombas peristálticas, el caudal medido con el sensor muestra un comportamiento oscilante debido a la alta precisión del sensor de flujo, que es capaz de medir los impulsos de flujo producidos por la bomba.
- Es recomendable el uso de un supresor de pulsos si se quiere evitar la lectura oscilante del caudal en sistemas FIA y así poder obtener una respuesta lineal prácticamente constante o con ligeras variaciones.
- En la implementación en sistemas de flujo SIA se vuelve a poner de manifiesto la buena precisión del dispositivo puesto que los valores de caudal medidos son prácticamente idénticos a los caudales teóricos, mostrando un error prácticamente nulo entre el obtenido con el sensor y el previamente conocido.
- En general, se concluye que la elección del medidor ha sido correcta, pues representa con gran precisión y sensibilidad el caudal real y cumple con las exigencias de flujo impuestas por el proyecto.

11. Estudio económico

En este apartado se presentan los costes asociados al proyecto. Dichos costes se dividen en costes por equipo utilizado, por material utilizado y por recursos humanos.

Tabla 11.1 Costes asociados al equipo utilizado

Equipo	Coste (€)	Vida útil (años)	Tiempo de utilización (años)	Coste amortización (€)
Ordenador	800	10	1	80
Bomba peristáltica	2800	10	1	560
Balanza	130	10	1	13
Subtotal				653 €

El coste de los equipos utilizados se determina mediante el coste de amortización:

$$\text{Amortización} = \frac{\text{coste equipo}}{\text{vida útil}} \cdot \text{tiempo utilización}$$

Tabla 11.2 Costes asociados al material utilizado

Material	Cantidad (ud.)	Coste unitario (€/ud.)	Coste total (€)
Conectores de tubos (bolsa 10 ud.)	1	18,11	18,11
Vasos de precipitados	2	2,50	5
Tubos de bomba (bolsa 10 ud.)	1	30	30
Tubos PTFE-teflón 0.8 mm (bolsa 20 ud.)	1	27,48	27,48
Kit Sensirion SLI-2000 (incluido envío)	1	990	990
Subtotal			1.070,59

Tabla 11.3 Costes asociados a recursos humanos y servicios

Recursos humanos y servicios	Cantidad (h)	Coste unitario (€/h)	Coste total (€)
Experimentación	30	20	600
Estudio bibliográfico	150	20	3.000
Confección memoria	150	20	3.000
Análisis y tratamiento de datos	10	20	200
Estudio de mercado	50	20	1.000
Agua y luz	-	-	50
Gastos de impresión	-	-	40
Subtotal			7.890 €

Tabla 11.4 Coste total del proyecto

Equipo	653
Material	1.070,59
Recursos humanos y servicios	7.890
Coste total bruto	9.613,59 €
I.V.A (21%)	2.018.85
Total	11.632,44 €

12. Consideraciones ambientales

En este proyecto se han tenido en cuenta aspectos medioambientales, tal y como marcan las directrices de la escuela en la realización de trabajos de final de grado acordes con el concepto de sostenibilidad que debe regir en cualquier proyecto.

Gran parte de este proyecto ha sido desarrollado en forma teórica, lo que no ha implicado ningún efecto, ni positivo ni negativo, en el medio ambiente.

Tras la adquisición del dispositivo, se ha utilizado agua destilada para realizar las pruebas. Agua que ha sido finalmente reutilizada tras su uso.

El único punto negativo de impacto ambiental es la necesidad de electricidad para el ordenador que permite el uso del programa de visualización del sensor.

13. Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer el apoyo de mi tutor en este proyecto, el profesor Antonio Florido. Me ha introducido en un tema como es el de los caudalímetros, en el cual nunca me había metido de lleno y que ha resultado ser muy interesante. Gracias al trabajo que él me propuso y a sus indicaciones he podido aprender algo más allá de lo estrictamente académico y técnico: he aprendido a tratar y a mantener contacto con empresa y distribuidores, a ser paciente y a pelearme (en el sentido positivo de la palabra) para conseguir mis objetivos.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a empresas y distribuidores que tomaron parte de su tiempo para atener las dudas y necesidades de un estudiante como yo. En especial, a Manuel Meier, técnico de asistencia al cliente de la empresa Sensirion, con el que mantuve contacto a través de correo electrónico en varias ocasiones y quien siempre ha resuelto mis dudas con amabilidad y celeridad.

Finalmente, a mi familia. A mi pareja, Sandra, que siempre me ha ayudado en mis peores momentos y me ha dado el apoyo moral que necesitaba. A mis amigos, que jamás han dudado de mí. Y en especial a mi madre, la persona que más se ha sacrificado durante tantos años para darme la mejor educación y para darme la posibilidad de cumplir mis sueños. No sería quien soy ni estaría donde estoy si no fuera por ella.

14. Bibliografía

- [1] Amalia Cerdà & Víctor Cerdà, An introduction to flow analysis, First Edit, CRISON INSTRUMENTS, S.A., Palma de Mallorca, 2009.
- [2] S. Nualart Sanjuán, Aplicación de la técnica de la potenciometría de inyección de flujo (FIP) para la monitorización de procesos de biosorción del ión Cu (II) en raspo de uva, (2009). <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/8239> (accessed May 24, 2016).
- [3] P. Esteban Olmos, E. Millán López, Análisis de metales en procesos de biosorción mediante la aplicación de lenguas electrónicas, (2014). <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/22642> (accessed May 24, 2016).
- [4] <http://www.ideiam.com/>, (accessed June 6, 2016).
- [5] R.C. Baker, Flow Measurement Handbook, First Edit, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- [6] M.C. Potter, D.C. Wiggert, M. Hondzo, Mecánica de fluidos, Prentice Hall, México [etc.] :, 1998. http://cataleg.upc.edu/record=b1200894~S1*cat (accessed May 24, 2016).
- [7] B.S. Massey, J. Ward-Smith, Mechanics of fluids, Spon Press, New York :, 2005. http://cataleg.upc.edu/record=b1392894~S1*cat (accessed May 24, 2016).
- [8] M. Pereira, Flow meters: Part 1, IEEE Instrum. Meas. Mag. 12 (2009) 18–26. doi:10.1109/MIM.2009.4762948.
- [9] R.W. Miller, Flow measurement engineering handbook, McGraw-Hill, New York :, 1996. http://cataleg.upc.edu/record=b1213771~S1*cat (accessed May 18, 2016).
- [10] http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4918/html/22_ecuacin_d_e_continuidad.html, (accessed March 22, 2016).
- [11] L. García Gutiérrez, La Medida del caudal, AENOR, Madrid :, 1997. http://cataleg.upc.edu/record=b1129801~S1*cat (accessed May 24, 2016).
- [12] M. López, M. Ramón, Medición de caudal, Instrumentación Y Comun. Ind. (2007) 1–21. doi:10.1002/0471684228.egp01828.
- [13] J.M. Dias Pereira, Tutorial 20: Flow meters: Part 2 - Part 20 in a series of tutorials in instrumentation and measurement, IEEE Instrum. Meas. Mag. 12 (2009) 21–27. doi:10.1109/MIM.2009.5054549.
- [14] <http://www.sivaee.com/14550310/daehan-flow-nozzle->, (accessed March 16, 2016).
- [15] http://www.engineeringtoolbox.com/flow-meters-d_493.html, (accessed May 10, 2016).

- [16] <http://www.nasa.gov/>, (accessed March 22, 2016).
- [17] <http://www.directindustry.es/>, (accessed March 10, 2016).
- [18] <http://krohne.com/>, (accessed May 10, 2016).
- [19] <http://www.fuelingequipments.com/>, (accessed May 22, 2016).
- [20] P.J. LaNasa, E.L. Upp, Fluid Flow Measurement, 2014. doi:10.1016/B978-0-12-409524-3.00004-6.
- [21] http://www.industriaynegocios.cl/Academicos/AlexanderBorger/Docts%20Docencia/Seminario%20de%20Aut/trabajos/trabajos%202003/Sem%20Aut%20%20Caudal/web-final/Medidores%20Volumetricos.htm#_Medidor_de_pist%C3%B3n_oscilante, (accessed May 29, 2016).
- [22] http://www.et4u.org/Toy_information/Cylinder_flow.html, (accessed March 29, 2016).
- [23] http://opwx.db.erau.edu/faculty/mullerb/Wx365/Island_effects/island_effects.html, (accessed May 15, 2016).
- [24] <http://chandraelinsugm.blogspot.com.es/2010/12/flow-measurement-bagian-iv.html>, (accessed May 15, 2016).
- [25] <http://www.flujamanos.com/technical-information/types-of-gas-mass-flow-meters/attachment/doppler-flow-meter/>, (accessed May 12, 2016).
- [26] R.J. Goldstein, Fluid mechanics measurements, Springer-Verlag [distribution], Berlin [etc.] :, 1983. http://cataleg.upc.edu/record=b1005898~S1*cat (accessed May 24, 2016).
- [27] <http://www.sensirion.com>, (accessed March 12, 2016).
- [28] B.S. Eoin Gillespie, The formation, modification and characterisation of monolithic ion exchangers for separation science, Dublin City University, 2009.
- [29] A.J. Zemmann, Conductivity detection in capillary electrophoresis, Trends Anal. Chem. 20 (2001) 346–354. doi:10.1016/S0165-9936(01)00076-0.
- [30] J.A. Fracassi Da Silva, N. Guzman, C.L. Do Lago, Contactless conductivity detection for capillary electrophoresis: Hardware improvements and optimization of the input-signal amplitude and frequency, J. Chromatogr. A. 942 (2002) 249–258. doi:10.1016/S0021-9673(01)01380-2.
- [31] M. Pumera, Contactless conductivity detection for microfluidics: Designs and applications, Talanta. 74 (2007) 358–364. doi:10.1016/j.talanta.2007.05.058.
- [32] H. Ji, X. Gao, B. Wang, Z. Huang, H. Li, A new method for flow rate measurement in millimeter-scale pipes., Sensors (Basel). 13 (2013) 1563–77. doi:10.3390/s130201563.

- [33] M. Takamoto, H. Ishikawa, K. Shimizu, H. Monji, G. Matsui, New measurement method for very low liquid flow rates using ultrasound, *Flow Meas. Instrum.* 12 (2001) 267–273. doi:10.1016/S0955-5986(01)00023-1.
- [34] D.A. Czaplewski, B.R. Ilic, M. Zalalutdinov, W.L. Olbricht, A.T. Zehnder, H.G. Craighead, T.A. Michalske, A micromechanical flow sensor for microfluidic applications, *J. Microelectromechanical Syst.* 13 (2004) 576–585. doi:10.1109/JMEMS.2004.832179.
- [35] <http://www.gilson.com/en/AI/Products/32.228/Default.aspx#.V21ZRRJ-Yms>, (accessed June 16, 2016).
- [36] D. de Lamo Valverde, Diseño y construcción de un sistema de Análisis de Inyección Secuencial para la monitorización de procesos mediante lenguas electrónicas, (2014). <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/25141> (accessed May 24, 2016).